

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra elektroenergetiky

**Vypínání jednopólových FLR odpojovačů v EMTP-
ATP**

**Shutdown of Single-Pole FLR Disconnectors in
EMTP-ATP**

2018

Bc. Michal Česák

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra elektroenergetiky

Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Michal Česák**
Studijní program: N2649 Elektrotechnika
Studijní obor: 3907T001 Elektroenergetika
Téma: **Vypínání jednopólových FLR odpojovačů v EMTP-ATP**
Shutdown of Single-Pole FLR Disconnectors in EMTP-ATP
Jazyk vypracování: čeština

Zásady pro vypracování:

1. Vliv odpojovačů na elektrizační soustavu
2. Model a simulace vybraných provozních stavů
3. Doporučení k provozu odpojovačů na základě provedených simulací

Seznam doporučené odborné literatury:

Toman, P. a kol.: Provoz distribučních soustav. Praha : ČVUT, 2011. 264 s. ISBN 978-80-01-04935-8

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí diplomové práce: **doc. Dr. Ing. Veleslav Mach**

Datum zadání: 01.09.2017

Datum odevzdání: 30.04.2018

prof. Ing. Stanislav Rusek, CSc.
vedoucí katedry

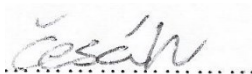


prof. Ing. Pavel Brandštetter, CSc.
děkan fakulty

Prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou/diplomovou práci vypracoval samostatně. Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.

V Ostravě, dne 27.4.2018

Podpis 

Poděkování

Tímto děkuji vedoucímu diplomové práce doc. Dr. Ing. Věslavu Machovi za jeho pedagogickou a odbornou pomoc, za tolik potřebnou motivaci a náměty k zamyšlení. Rovněž bych rád vyjádřil velký dík Ing. Romanu Vaňkovi, Ph. D. za jeho profesionální vhled do problematiky, čas a veškerou pomoc, kterou mi poskytl v průběhu tvorby této práce.

Abstrakt

Diplomová práce se zabývá poruchou, způsobenou jednopólovým FLRm odpojovačem výrobce DRIBO Brno s.r.o. na úseku vedení napájecí linky Albrechtice – Horní Suchá – Lazy – Petřvald, kde vlivem neočekávaného přerušení fáze jednopólovým odpojovačem vznikla napět'ová nesymetrie, která měla za následek nárůst fázových napětí na neporušených fázích.

Klíčová slova

Odpojovač, napět'ová nesymetrie, EMTP-ATP, přepětí, přechodný děj, porucha, síťová konfigurace, distribuční síť, vysoké napětí

Abstract

Thesis investigates a fault detected in part of a powerline, supplying an area of Albrechtice – Horní Suchá – Lazy – Petřvald, caused by a single-pole FLRm disconnecting switch made by DRIBO Brno s.r.o. company. The effect of the fault was an interruption of one phase which caused a significant voltage imbalance that subsequently resulted in an increase of phase voltages in uninterrupted phases.

Keywords

Disconnecting switch, voltage imbalance, EMTP-ATP, excess voltage, transient, fault, network configuration, distribution network, high voltage

Obsah

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK	- 7 -
SEZNAM OBRÁZKŮ	- 9 -
SEZNAM TABULEK	- 11 -
ÚVOD	- 12 -
1. Vliv odpojovačů na elektrizační soustavu	- 13 -
1.1 Provoz distribučních sítí VN [6]	- 13 -
1.2 ZEMNÍ SPOJENÍ	- 14 -
1.2.1 Sítě s izolovaným uzlem	- 15 -
1.2.2 Kompenzované sítě	- 16 -
1.2.3 Sítě uzemněné přes odpor	- 17 -
1.3 DETEKCE PORUCH [6]	- 18 -
1.3.1 Statické metody využívané pro kompenzované distribuční sítě	- 18 -
1.3.2 Dynamické metody	- 19 -
1.4 LOKALIZACE PORUCH [6]	- 21 -
1.5 PORUCHA CHARAKTERU MÍSTNÍ NESYMETRIE	- 23 -
1.5.1 Souměrné složky parametrů vedení [10]	- 23 -
1.6 PŘERUŠENÍ JEDNÉ FÁZE [1]	- 25 -
1.7 PŘEPĚTÍ NA HLADINĚ VN	- 27 -
1.8 ZOTAVENÉ NAPĚTÍ [4]	- 28 -
1.9 ODPOJOVAČ FLRM	- 30 -
1.9.1 Popis a ovládání odpojovače typu Flrm výrobce DRIBO	- 30 -
1.10 PROBLEMATIKA APLIKACE ODPOJOVAČŮ FLRM	- 32 -
1.10.1 Definice vyšetřovaného problému	- 32 -
1.10.2 Modelovaná síť	- 32 -
2. MODEL A SIMULACE VYBRANÝCH PROVOZNÍCH STAVŮ	- 33 -
2.1 SIMULAČNÍ PROGRAM EMTP-ATP	- 33 -
2.2 SIMULAČNÍ MODEL	- 33 -
2.3 SKLADBA SIMULAČNÍHO MODELU	- 34 -
2.3.1 Nadřazená síť	- 34 -
2.3.2 Transformátory	- 34 -
2.3.3 Náhradní kapacita sítě	- 36 -
2.3.4 Vedení	- 36 -
2.3.5 FLR odpojovač	- 38 -
2.3.6 Zátěž	- 39 -
2.4 VÝPADEK FLRM ODPOJOVAČE V MÍSTĚ O1	- 40 -
2.5 VÝPADEK FLRM ODPOJOVAČE V MÍSTĚ O2	- 42 -
2.6 VÝPADEK FLRM ODPOJOVAČE V MÍSTĚ O1 – MODIFIKACE	- 44 -
2.7 VÝPADEK FLRM ODPOJOVAČE V MÍSTĚ O2 – MODIFIKACE	- 48 -
3. DOPORUČENÍ K PROVOZU ODPOJOVAČŮ NA ZÁKLADĚ PROVEDENÝCH SIMULACÍ - 50 -	
SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	- 52 -
SEZNAM PŘÍLOH	- 53 -

Seznam použitých symbolů a zkratek

C	(F)	Kapacita
C_0	(μ F)	Fázová kapacita
E	(V)	Vnitřní napětí náhradního zdroje
f_0	(Hz)	Vlastní kmitočet
I	(A)	Efektivní hodnota proudu
\underline{I}_0	(A)	Netočivá složka proudu
\underline{I}_1	(A)	Sousledná složka proudu
\underline{I}_2	(A)	Zpětná složka proudu
I_A	(A)	Efektivní hodnota proudu fáze A
I_B	(A)	Efektivní hodnota proudu fáze B
I_C	(A)	Efektivní hodnota proudu fáze C
I_p	(A)	Efektivní hodnota poruchového proudu
I_U	(A)	Efektivní hodnota proudu fáze U
I_V	(A)	Efektivní hodnota proudu fáze V
I_W	(A)	Efektivní hodnota proudu fáze W
L	(H)	Indukčnost
R	(Ω)	Elektrický odpor
S_n	(MVA)	Jmenovitý zdánlivý výkon
S_Z	(MVA)	Zdánlivý výkon zátěže
\underline{U}_0	(V)	Netočivá složka napětí
\underline{U}_1	(V)	Sousledná složka napětí
\underline{U}_2	(V)	Zpětná složka napětí
U_A	(kV)	Efektivní hodnota napětí fáze A
U_B	(kV)	Efektivní hodnota napětí fáze B
U_C	(kV)	Efektivní hodnota napětí fáze C
U_f	(kV)	Efektivní hodnota fázového napětí
U_o	(V)	Efektivní hodnota napětí na tlumivce
U_{ob}	(V)	Efektivní hodnota obnoveného napětí
U_m	(kV)	Maximální napětí (amplituda)
U_s	(kV)	Efektivní hodnota sdruženého napětí

U_U	(V)	Efektivní hodnota napětí fáze U
U_V	(V)	Efektivní hodnota napětí fáze V
$U_{V\max}$	(V)	Maximální napětí vrcholu zotaveného napětí
U_W	(V)	Efektivní hodnota napětí fáze W
X_L	(Ω)	Induktivní reaktance
Y_0	(S)	Nulová složka admitance
Z	(Ω)	Impedance
\underline{Z}_{c0}	(Ω)	Nulová složka impedance
\underline{Z}_{c1}	(Ω)	Sousledná složka impedance
\underline{Z}_{c2}	(Ω)	Zpětná složka impedance
Z_U	(Ω)	Impedance fáze U
Z_V	(Ω)	Impedance fáze V
Z_W	(Ω)	Impedance fáze W
[F]	(-)	Fortescuova transformační matice
Z_Δ	(Ω)	Přídavná impedance v místě poruchy
i_0	(A)	Okamžitá hodnota netočivé složky proudu
j	(-)	Komplexní jednotka
p	(-)	Překmit zotaveného napětí
q_0	(C)	Náboj nahrazující netočivou složku proudu
s	(V/s)	Strmost zotaveného napětí
t	(s)	Čas
t_0	(s)	Čas vzniku zemního spojení
τ	(s)	Čas
ω	(rad/s)	Úhlový kmitočet

Seznam obrázků

Obr. 1 Příklad systémů uzemnění [6].....	- 13 -
Obr. 2 Síť s izolovaným uzlem [11]	- 15 -
Obr. 3 Síť s izolovaným uzlem při zemním spojení [11]	- 15 -
Obr. 4 Fázorový diagram k obr. 2 [11]	- 15 -
Obr. 5 Fázorový diagram k obr. 3 [11]	- 15 -
Obr. 6 Náhradní schéma sítě kompenzované tlumivkou [11]	- 16 -
Obr. 7 Fázorový diagram k obr. 6 [11]	- 16 -
Obr. 8 Náhradní schéma sítě uzemněné přes odpor [13].....	- 17 -
Obr. 9 Charakteristika wattmetrického článku [6].....	- 18 -
Obr. 10 $q-u$ diagram tří vývodů (q_{oA} v poruše, q_{oB} a q_{oC} bez poruchy) [6].....	- 20 -
Obr. 11 Instalované indikátory poruch [15]	- 21 -
Obr. 12 Lokalizace poruchy [6].....	- 22 -
Obr. 13 Zapojení příčného symetrického článku [12].....	- 23 -
Obr. 14 Zapojení podélného symetrického článku [12].....	- 23 -
Obr. 15 Vizualizace nesymetrické soustavy, sousledné, zpětné a netočivé složky [14]	- 23 -
Obr. 16 Schématické znázornění přerušení jedné fáze [12]	- 25 -
Obr. 17 Náhradní schémata složkových soustav při přerušení fáze [1]	- 25 -
Obr. 18 Přerušení zkratu [4]	- 28 -
Obr. 19 Průběh napětí na vypínači při přerušení obvodu [4]	- 28 -
Obr. 20 Průběh zotaveného napětí jednofrekvenčního obvodu [4].....	- 29 -
Obr. 21 Jednopolový odpojovač typu Flrm DRIBO [2].....	- 30 -
Obr. 22 Ilustrace rozpínání [2]	- 30 -
Obr. 23 Ilustrace zapínání [2]	- 30 -
Obr. 24 Schématický náčrt variant odpojovače Flrm [2].....	- 31 -
Obr. 25 Parametry odpojovače DRIBO FLRm [2]	- 31 -
Obr. 26 Zjednodušené schéma vyšetřované síťové konfigurace	- 32 -
Obr. 27 Simulační model	- 33 -
Obr. 28 Konfigurace prvku AC source	- 34 -
Obr. 29 Prvek BCTRAN	- 34 -
Obr. 30 Konfigurace prvku BCTRAN	- 35 -

Obr. 31 Prvek RLC-Y 3-ph	- 36 -
Obr. 32 Prvek typu LCC template	- 36 -
Obr. 33 Konfigurace prvku LCC template	- 36 -
Obr. 34 Parametry vedení.....	- 37 -
Obr. 35 Rozmístění vodičů [12]	- 37 -
Obr. 36 Prvek typu Switch time 3-f.....	- 38 -
Obr. 37 Konfigurace prvku Switch time 3-f.....	- 38 -
Obr. 38 Prvek typu RLC-D 3-ph	- 39 -
Obr. 39 Časová závislost okamžitých hodnot napětí – porucha v O1	- 40 -
Obr. 40 Detail časové závislosti okamžitých hodnot napětí – porucha v O1	- 40 -
Obr. 41 Časová závislost efektivních hodnot napětí – porucha v O1	- 41 -
Obr. 42 Časová závislost okamžitých hodnot napětí – porucha v O2.....	- 42 -
Obr. 43 Detail časové závislosti okamžitých hodnot napětí – porucha v O2	- 42 -
Obr. 44 Časová závislost efektivních hodnot napětí – porucha v O2	- 43 -
Obr. 45 Prvek typu GROUP	- 44 -
Obr. 46 Upravené simulační schéma	- 44 -
Obr. 47 Obsah prvku typu GROUP	- 45 -
Obr. 48 Časová závislost okamžitých hodnot napětí – porucha v O1 (Modifikace).....	- 46 -
Obr. 49 Detail časové závislosti okamžitých hodnot napětí – porucha v O1 (Modifikace)	- 46 -
Obr. 50 Časová závislost efektivních hodnot napětí – porucha v O1 (Modifikace)	- 47 -
Obr. 51 Časová závislost okamžitých hodnot napětí – porucha v O2 (Modifikace).....	- 48 -
Obr. 52 Detail časové závislosti okamžitých hodnot napětí – porucha v O2 (Modifikace)	- 48 -
Obr. 53 Časová závislost efektivních hodnot napětí – porucha v O2 (Modifikace)	- 49 -
Obr. 54 Výpadek FLR na lince Albrechtice – Kunčice	- 50 -

Seznam tabulek

Tab. 1 Štítkové údaje transformátoru [7]	- 35 -
Tab. 2 Hodnoty amplitud napětí – rozvodna	- 40 -
Tab. 3 Efektivní hodnoty napětí před a po vzniku poruchy	- 41 -
Tab. 4 Hodnoty amplitud napětí – porucha na konci vedení	- 42 -
Tab. 5 Efektivní hodnoty napětí před a po vzniku poruchy	- 43 -
Tab. 6 Hodnoty amplitud napětí – porucha v O1 (Modifikace)	- 46 -
Tab. 7 Efektivní hodnoty napětí před a po vzniku poruchy	- 47 -
Tab. 8 Hodnoty amplitud napětí – porucha v O2 (Modifikace)	- 48 -
Tab. 9 Efektivní hodnoty napětí před a po vzniku poruchy	- 49 -

Úvod

Distribuční sítě vysokého napětí jsou jednou z nejrozšířenějších a nejhustších energetických infrastruktur na území České republiky. Jsou proto také nejnáročnější na údržbu a kontrolu ze strany dispečinku.

Vzhledem k tomu, že práce pojednává o velice konkrétní problematice, jsou rozpracovány pouze kapitoly teoretické elektroenergetiky a přechodných jevů v elektrizačních soustavách, které mají přímou návaznost na projevy související s aplikací FLRm odpojovačů a vyšetřovanou poruchou. Zmíněny jsou také metody detekce poruch na vedení a obecná analytická řešení přechodných dějů, které nastávají při poruše FLRm odpojovačů.

Práce se dále zabývá popisem konkrétní situace vzniklé na vysokonapětovém vedení linky Albrechtice – Kunčice, která je následně rekonstruována pomocí simulačního programu EMTP-ATP.

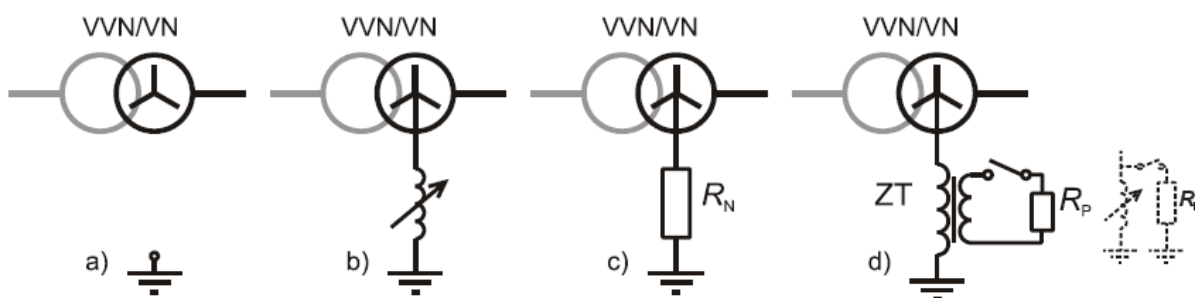
Simulace poruchy odpojovače FLRm je provedena ve čtyřech provozních stavech s pozicemi odpojovačů přibližně odpovídajícími rozmístění ve skutečné síti, kdy dva případy pracují s malou napájenou sítí, modifikované případy jsou pak modelovány s rozsáhlou napájenou sítí, což blíže odpovídá skutečnému scénáři, který na síti rekonstruované v programu EMTP-ATP nastal.

Cílem práce bylo zejména vysledovat vliv vzdálenosti poruchového odpojovače od rozvodny na velikost vzniklé nesymetrie a na základě těchto zjištění učinit doporučení k dalšímu provozu těchto odpojovačů v distribučních sítích VN.

1. Vliv odpojovačů na elektrizační soustavu

1.1 Provoz distribučních sítí VN [6]

Z hlediska provozu se distribuční sítě VN dělí do několika základních skupin. Dle charakteru provozu na soustavu s napětovými hladinami 10, 22, 35 kV, dále dle systému zapojení uzlu transformátoru. Transformátory bývají standardně zapojeny způsobem YNyn0/d s vyvedenými středy. V ČR jsou u venkovních sítí nejpoužívanější zapojení s nepřímým uzemněním transformátorového uzlu přes zhášecí tlumivku, též známou pod pojmem Petersenova cívka, využívanou pro kompenzaci zemních kapacitních proudů tekoucích zemí zpět do transformátoru skrze vyvedený střed při zemních spojeních.



Obr. 1 Příklad systémů uzemnění [6]

Zásadní rozdíl mezi jednotlivými systémy zapojení vystupuje v poruchových případech, kdy dochází k vodivému spojení fáze se zemí. V případech sítí s účinným uzemněním nebo v sítích uzemněných přes uzlový odporník hovoříme o **jednofázovém zkratu** kvůli značným hodnotám poruchového proudu, který vylučuje další provoz poruchové soustavy. U těchto sítí je tedy nutné v případě zmíněné poruchy odpojit postižené vedení, což má za následek přerušení dodávky elektrické energie. V sítích izolovaných či neúčinně uzemněných nazýváme poruchy typu vodivého spojení fáze se zemí tzv. **zemním spojením**. Poruchový proud je u těchto konfigurací podstatně menší, nežli u sítí s účinným uzemněním/uzemněním přes odporník, odpojení postižené linky proto není nezbytně nutné. Velikost poruchového proudu je rozhodující pro analýzu rizika úrazu elektrickým proudem, dimenzování, vyhodnocení mechanických následků způsobených poruchou. Distribuční sítě VN jsou svým zastoupením mezi venkovními sítěmi nejrozšířenější. Tato hustá infrastruktura je přirozeně vystavena mnohým nepříznivým vlivům, zejména atmosférickým a povětrnostním, díky kterým často dochází k přechodným poruchám typu zemního spojení, které zpravidla v krátkém čase odezní bez nutnosti přerušení dodávky elektrické energie. Právě z tohoto důvodu je většina vysokonapětových sítí na území České republiky provozována v systému tzv. neúčinného uzemnění.

1.2 Zemní spojení

Zemním spojením nazýváme spojení jedné fáze se zemí v sítích provozovaných s izolovaným uzlem transformátoru nebo v sítích kompenzovaných. Základní rozdíl mezi jednofázovým zkratem a zemním spojením spočívá ve velikosti a charakteru poruchového proudu. Zatímco u jednofázových zkratů místem poruchy protéká proud induktivního charakteru několikrát vyšší nebo blízký proudu provoznímu, u zemního spojení místem poruchy protéká pouze malý proud charakteru kapacitního. V izolovaných sítích při ustáleném provozním stavu protékají fázovými kapacitami k zemi kapacitní proudy, které se ale za předpokladu symetrické sítě se symetrickým napětím po jejich součtu navzájem vyruší, nicméně pokud dojde v takové síti k zemnímu spojení, kapacitní proudy ze zdravých fází se uzavírají přes zem, místo poruchy a vinutí transformátoru (viz. Obr. 2 a Obr. 3). Zemí pak procházejí proudy, které v rozsáhlejších sítích mohou dosahovat značných velikostí. [1]

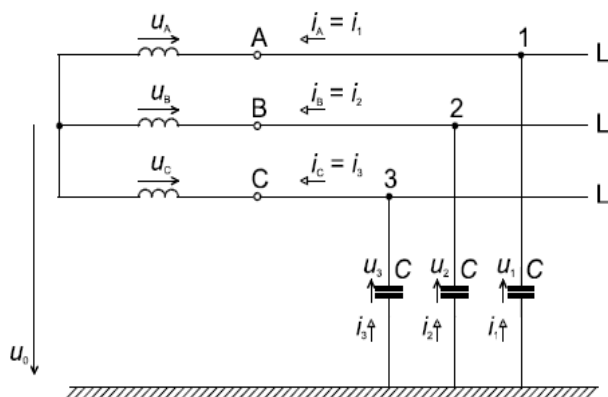
Pokud není překročena stanovená hodnota poruchového proudu, může být síť s izolovaným uzlem dále provozována jen na dvou zdravých fázích.

Pokud při zemním spojení hoří elektrický oblouk nestabilně (dochází k jeho uhasínání a opětovnému zapalování), vzniká tzv. přerušované zemní spojení, které může být zdrojem nebezpečných přepětí v síti.

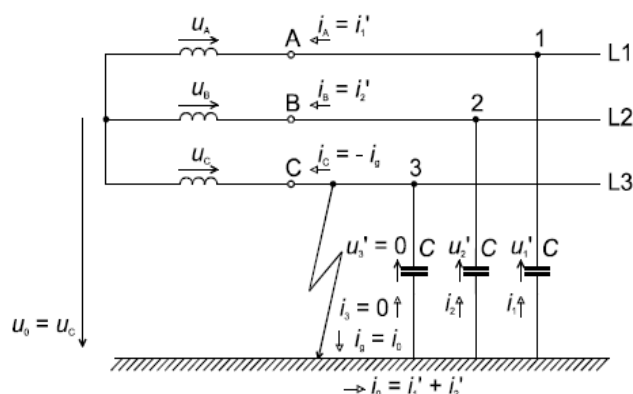
Účinným prostředkem pro potlačení oblouku v místě zemního spojení je použití kompenzační tlumivky, zapojené na vyvedeném středu transformátoru, jejíž indukčnost je nastavena tak, aby induktivní proud tekoucí od tlumivky k zemnímu spojení kompenzoval kapacitní proudy zdravých fází. (viz. Obr. 6)

1.2.1 Síť s izolovaným uzlem

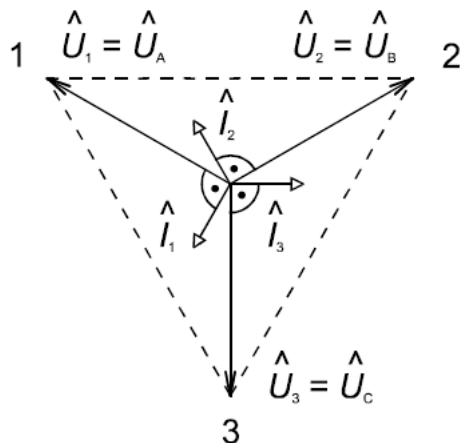
Sítě s izolovaným uzlem jsou provozovány zejména u malých či průmyslových rozvodů, kde celková hodnota kapacitního proudu nedosahuje hodnoty 20 A. Nízké hodnoty poruchového proudu jsou také jedním z důvodů, proč se izolované sítě dají provozovat i při vzniku poruchy typu zemního spojení. Kapacitní proudy o velikosti ≤ 20 A totiž minimalizují výskyt nebezpečného dotykového či krokového napětí v soustavě a symetrie sdružených napětí zůstává po dobu zemního spojení zachována. Kapacitní proud soustavy je dán fázorovým součtem kapacitních proudů nepostížených fází sítě, které se uzavírají přes místo zemního spojení a je tedy vázán na velikost provozované sítě. Pokud dochází k překročení mezní hodnoty celkového kapacitního proudu, je nutné provést kompenzaci.



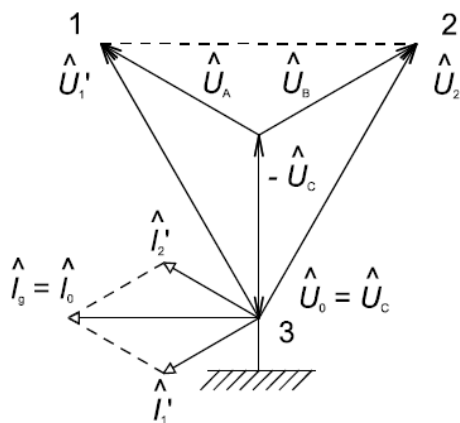
Obr. 2 Síť s izolovaným uzlem [11]



Obr. 3 Síť s izolovaným uzlem při zemním spojení [11]



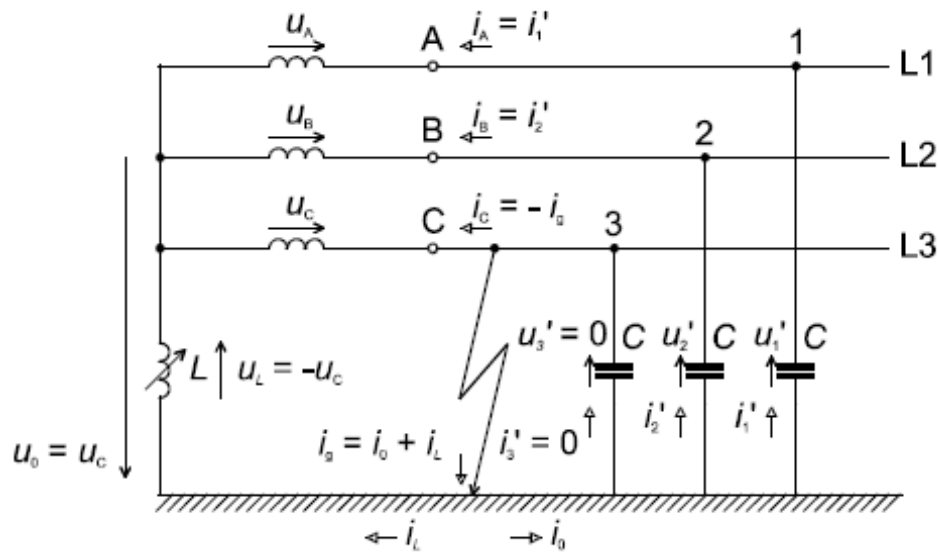
Obr. 4 Fázorový diagram k obr. 2 [11]



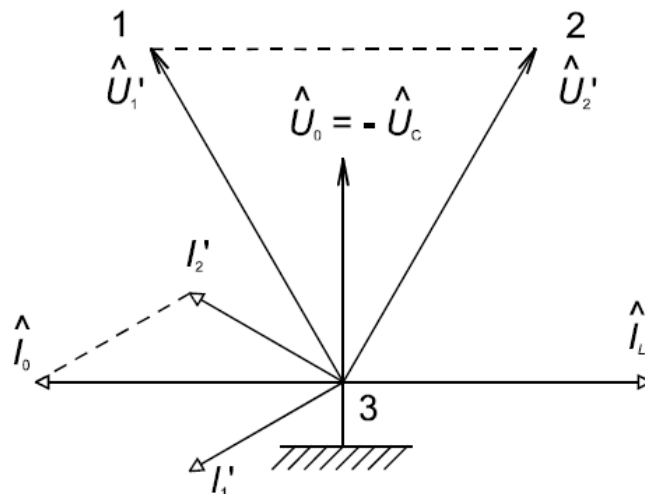
Obr. 5 Fázorový diagram k obr. 3 [11]

1.2.2 Kompenzované sítě

Nulový bod transformátoru je v kompenzovaných sítích spojen se zemnicí soustavou přes zhášecí tlumivku. Vzhledem k tomu, že kapacitní a induktivní proudy jsou proti sobě fázově natočené o 180° , jejich okamžité hodnoty se navzájem odečtou. Obvodem pak protéká pouze zbytkový činný proud úměrný svodové vodivosti vedení. V České republice bývá nejčastěji využíváno centralizované kompenzace, kdy je zapojena pouze jedna zhášecí tlumivka mezi uzel transformátoru a zemnicí soustavu rozvodny. Za provozu bývá tlumivka laděna automatickou, což zajišťuje paralelní rezonanci se zemní kapacitou provozované sítě. Výhodou kompenzovaných sítí je podobně jako u sítí izolovaných možnost provozu při poruše typu zemního spojení po dobu nutnou pro odstranění příčiny bez přerušení dodávky elektrické energie.



Obr. 6 Náhradní schéma sítě kompenzované tlumivkou [11]

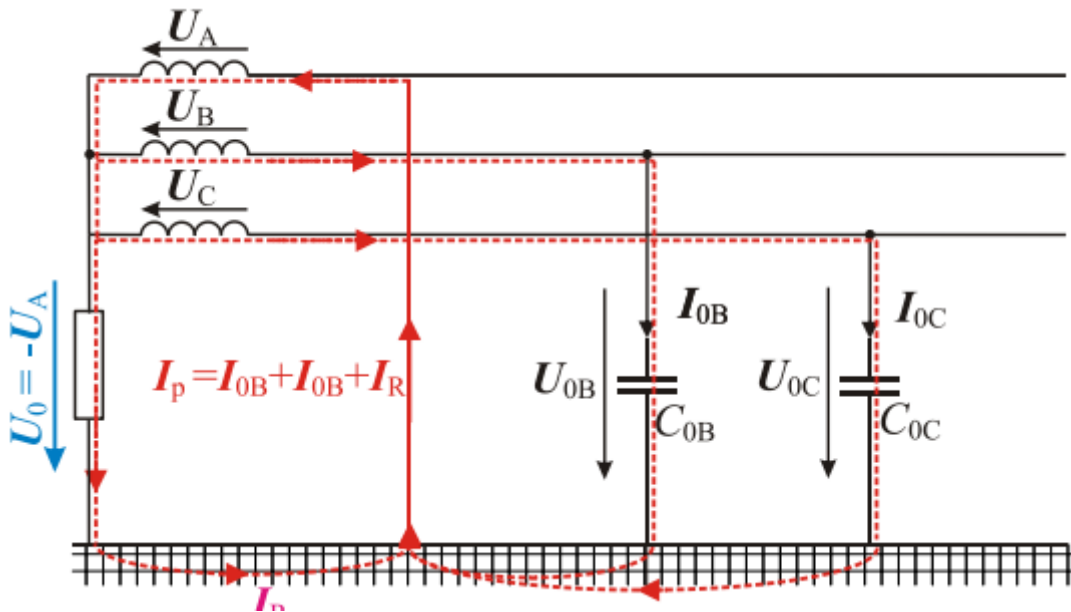


Obr. 7 Fázorový diagram k obr. 6 [11]

1.2.3 Síť uzemněné přes odpor

Způsob uzemnění sítě přes odpor je užíván zejména u vysokonapěťových kabelových sítí. Maximální povolený zkratový proud u kabelových sítí činí 1 kA, u venkovních a smíšených sítí pak 300 A. Vzhledem ke značným velikostem proudů, je nutné působením ochran okamžitě vypnout také postižený úsek. Takto uzemněná síť tedy nemůže být provozována s jednofázovou poruchou podobně jako síť kompenzovaná.

Při vzniku poruchy klesá napětí na postižené fázi a na uzlu napětí naopak narůstá téměř na hodnotu fázového napětí. Místem poruchy pak protéká poruchový proud, který je vektorovým součtem proudu odporem a kapacitního proudu sítě. Celková velikost poruchového proudu tedy obecně závisí na velikosti zemnicího odporu a rozsahu napájené sítě. Odpor omezuje velikost zkratového proudu, zmenšuje dobu dotykového napětí a tlumí přepětí. Vzhledem k těmto pozitivním vlastnostem snižuje případné poruchy vzniklé následkem jedнопólového zkratu, protože dochází k okamžitému odpojení celého úseku. Nedochází tak k námaze izolace vysokonapěťových zařízení. Dalším z pozitiv takto provozovaných sítí je i několikanásobně nižší poruchovost nežli u sítí zemněných přes zhášecí tlumivku.



Obr. 8 Náhradní schéma sítě uzemněné přes odpor [13]

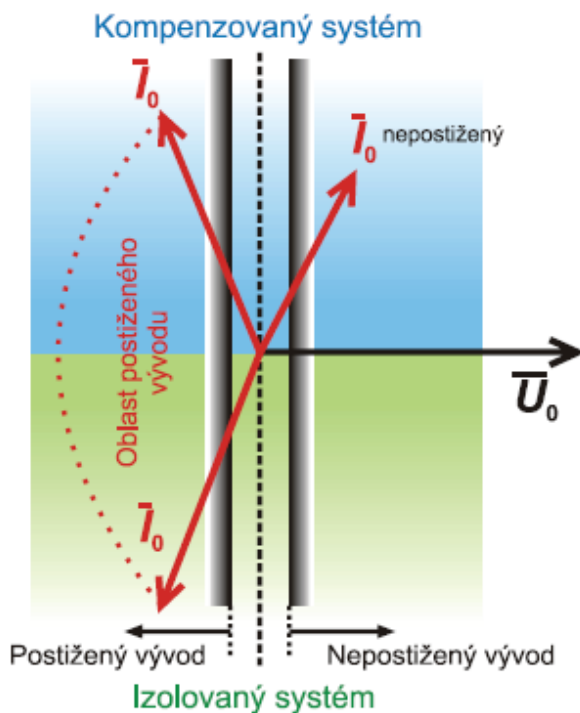
1.3 Detekce poruch [6]

Pro vyhledání zemního spojení se používají zařízení založené na metodách, které lze rozdělit na dvě základní skupiny, aktivní a pasivní. Aktivní metody využívají pomocného signálu se specifickou frekvencí, který je v případě poruchy poslán do soustavy. Následným trasováním tohoto signálu probíhá identifikace porouchaného vedení. Díky nižší technické náročnosti jsou však rozšířenější metody pasivní, které využívají napěťových a proudových signatur generovaných přímo sledovanou poruchou. Obecně lze říci, že statické metody využívají k identifikaci postiženého vývodu ustáleného stavu soustavy po odeznění přechodového děje způsobeného vznikem poruchy zemního spojení, zatímco aktivní metody využívají samotného přechodového děje, který nastává.

1.3.1 Statické metody využívané pro kompenzované distribuční sítě

Metoda detekce činné složky netočivého proudu (Wattmetrická metoda)

Vzhledem k nemožnosti absolutní kompenzace poruchového proudu zemního spojení, kdy vždy protéká zbytkový proud činného charakteru, se nabízí pro využití detekce právě tohoto činného proudu. Při vyhledávání poruchy se porovnávají orientace a velikosti netočivých proudů, popř. činných výkonů netočivé složky, které jsou na postižených vedeních vyšší než u vedení bez poruchy. Zásadní význam na funkci metody mají měřicí transformátory proudu a velikost činné složky netočivého proudu právě díky nízkým úrovním zbytkového proudu, který nabývá hodnot 3-10 % kapacitního proudu sítě. Pokud nejsou MTP správně navrženy, mohou způsobovat neselektivní působení metody. Z tohoto důvodu se pro zvýšení citlivosti ochran používá pomocného odporníku, který je krátkodobě připojen. Netočivá složka může mít v kompenzovaných sítích mírný fázový posun dle charakteru provozu a běžnému mírnému rozladění kompenzační tlumivky (viz. Obr. 9).



Obr. 9 Charakteristika wattmetrického článku [6]

Admitanční metoda netočivé složky

Metoda je založena na nepřetržitém sledování netočivé složky proudu a napětí. V případě překročení nastavené hodnoty netočivé složky napětí je proveden výpočet admitance.

$$Y_0 = \frac{I_0}{-U_0} \quad (1)$$

Častěji bývá pro vyhodnocení admitance využívána přírůstková metoda z důvodu omezení selhání metody způsobeného nesymetrií systému. V takovém případě se admitance vypočte z poměru přírůstků netočivých složek proudu a napětí mezi předporuchovým a poruchovým stavem. Admitanční metody také využívají při vyhodnocení násobky základní harmonické pro zvýšení citlivosti metody.

1.3.2 Dynamické metody

Metoda první půlperrody

Metoda využívá přechodného děje, který nastává okamžitě po vzniku zemního spojení, kdy dochází k vybíjení kapacity postižené fáze a nabití nepostižených fází v soustavě. Přechodný jev se projeví na netočivých složkách napětí a proudu a metoda pak porovnává průběhy okamžitých hodnot složek. Pokud je během první půlperrody po vzniku zemního spojení netočivá složka napětí a proudu ve fázi, je daný vývod vyhodnocen jako bezporuchový, pokud jsou složky v protifázi, vedení je vyhodnoceno jako poruchové.

Metoda q - u diagramu

Metoda využívá závislosti netočivé složky proudu, která představuje náboj q_0 na netočivé složce napětí. U vedení bez poruchy lze vybíjecí proces popsat funkcemi

$$u_0(t) = u_0(t_0) + \frac{1}{C_{eq}} \int_{t_0}^t i_0(\tau) d\tau \quad (2)$$

$$u_0(t) = u_0(t_0) + \frac{q_0(t)}{C_{eq}} \quad (3)$$

t_0 čas vzniku zemního spojení

C_{eq} ekvivalentní kapacita proti zemi všech nepostižených vedení v celé síti

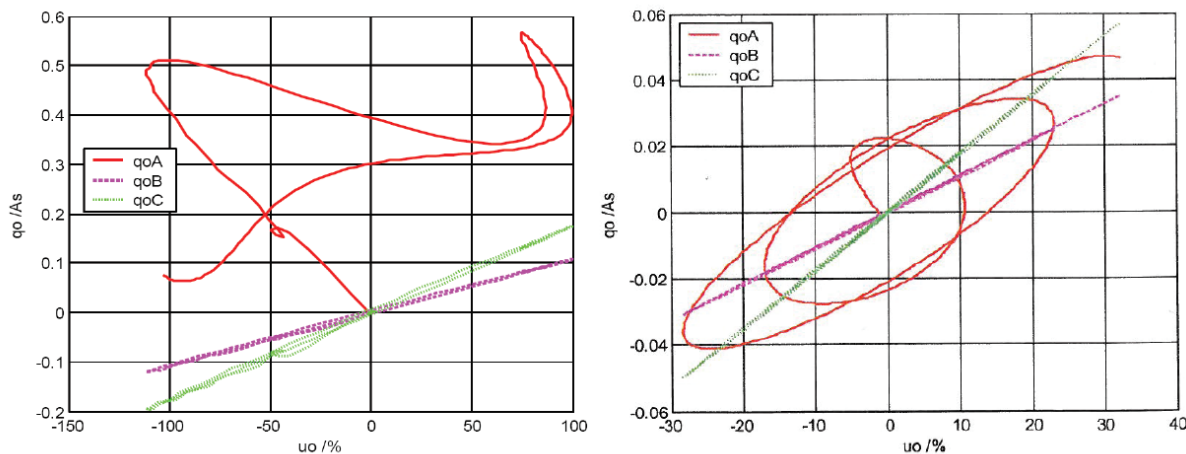
i_0 okamžitá hodnota netočivé složky proudu

Za předpokladu nulové okamžité hodnoty netočivé složky napětí v okamžiku vzniku zemního spojení nám rovnice (2) říká, že závislost integrálu i_0 na u_0 je ovlivněna pouze C_{eq} . Pro vedení bez poruchy pak platí závislost

$$u_0(t) = \frac{q_0(t)}{C_{eq}} \quad (4)$$

Z rovnice (4) plyne, že q_u diagram je přímka se směrnici C_{eq} .

Pokud se bude jednat o poruchové vedení, závislost nebude definována rovnicí (4), ale závislost bude začínat s opačným gradientem a nebude lineární (viz. Obr. 10).



Obr. 10 q - u diagram tří vývodů (q_0A v poruše, q_0B a q_0C bez poruchy) [6]

Metoda q - u diagramu byla zdokonalena do podoby q_u2 diagramu, kdy pro zvýšení citlivosti využívá filtrace části i_0 a u_0 , způsobené přirozenou nelinearitou vedení nebo nelineárním zatížením. V jednoduchosti filtruje netočivé složky obsažené v bezporuchovém stavu tak, aby ve vyhodnocovaných datech zůstaly jenom ty složky, způsobené nesymetrií poruchy.

1.4 Lokalizace poruch [6]

Odpínání úseků postiženého vývodu

Jedním z nejspolehlivějších způsobů lokalizace poruchy, který je rovněž nejdéle užívaným k lokalizaci postiženého úseku vedení, je postupné odpínání odboček a úseků vedení vývodu, který byl na základě identifikace vyhodnocen jako poruchový. Jednotlivé úseky či odbočky jsou odpínány do doby, než dojde k odpojení poruchy. Tímto způsobem je možné vymezit oblast s poruchou v síti, kam je následně povolána technická obsluha. Tato metoda je v našich podmínkách nejužívanější, nicméně z důvodu náročných dispečerských operací a nutnosti přerušení dodávky elektrické energie je vyvíjeno úsilí na nahrazení této metody sofistikovanějšími postupy.

Spojování postiženého vývodu do kruhu

Jednodušší alternativou lokalizace poruchy je spojení vývodu s poruchou do kruhu s vývodem bez poruchy, kdy se na základě přerozdělení netočivé složky proudu provádí následná identifikace místa poruchy. Homogenita parametrů vedení vyplývající z parametrické členitosti úseků vedení a konfigurací je však velmi obtížná a v některých případech úplně znemožňuje tvorbu modelu vedení nutného pro lokalizaci poruchy. Dalším nepříznivým vlivem je i variabilita parametrů jednotlivých prvků sítě vzhledem k povětrnostním podmínkám a ročnímu období. Na základě nedokonalostí manipulačních metod se další vývoj metod lokalizace poruch ubíral směrem tzv. indikátorů poruch.

Indikátory poruch pro venkovní vedení

Indikátory poruch umožňují sledováním napětí a proudů určit směr poruchy, kdy využívají zejména charakteristických změn netočivé složky proudu a napětí nebo proudových a napěťových poměrů fázových vodičů. Nejrozšířenější typy indikátorů jsou sledovače elektrického a magnetického pole chráněného vedení. Lze je instalovat na libovolné místo v síti bez nutnosti přerušení dodávky energie bez významných technických omezení. Indikátory lze rozdělit do dvou základních skupin, z nichž jedna sleduje celkové elektrické a magnetické pole vedení a druhá totéž, ale v jednotlivých fázích.

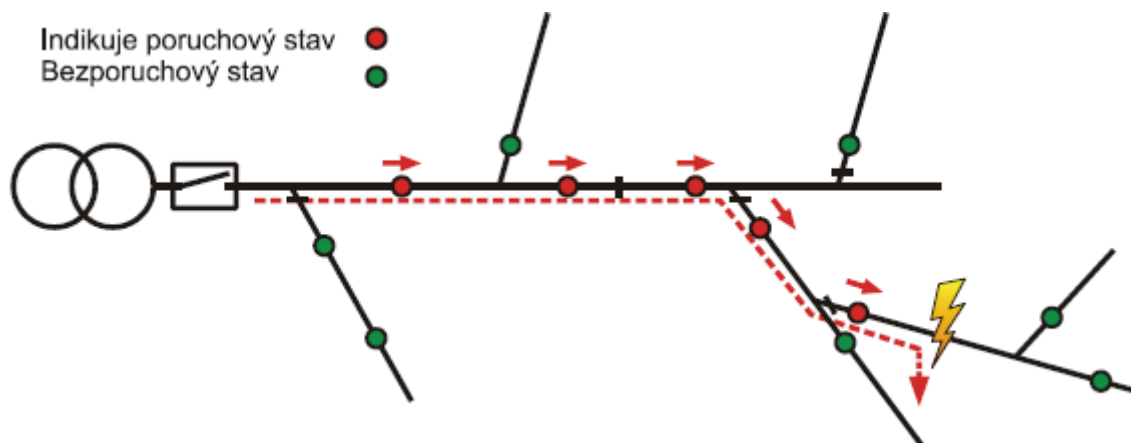


Obr. 11 Instalované indikátory poruch [15]

Pokud dojde k poruše, logika implementovaná v algoritmu řídicí jednotky sledovače vyhodnotí bilanci magnetického nebo elektrického pole a pokud je detekována imbalance, indikátory se pomocí instalovaných LED čipů rozsvítí a zároveň je odeslán signál dispečerovi skrze řídicí jednotku, která je montována na sloup v dostatečné vzdálenosti pro přenos signálu z jednotlivých indikátorů.

Princip lokalizace poruchy

Vzniklá porucha způsobí díky směrovosti indikátorů vybavení signalizace v celém úseku Rozvodna – porucha (viz. Obr. 12) a techničtí pracovníci pak v případě indikátorů s optickou signalizací dohledají trasováním indikátorů přesné místo poruchy, v případě dálkové signalizace jsou pak vysláni na konkrétní lokalitu.

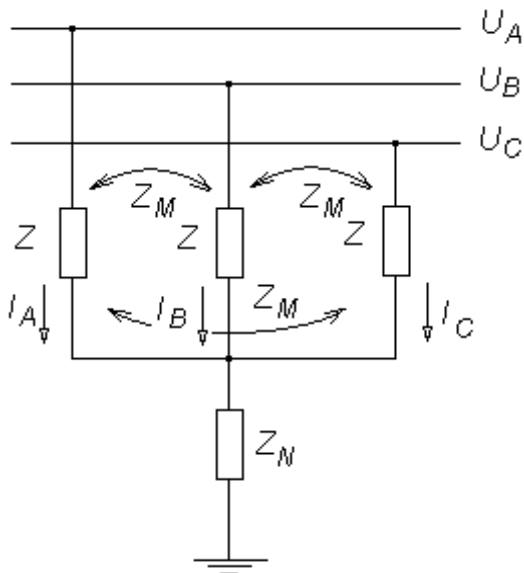


Obr. 12 Lokalizace poruchy [6]

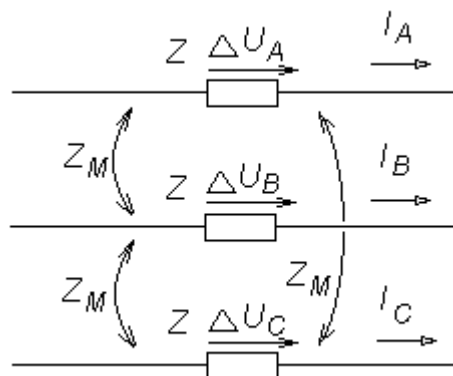
1.5 Porucha charakteru místní nesymetrie

V elektrizačních soustavách jsou nesymetrické provozní stavy nejčastěji způsobeny poruchami typu nesymetrických zkratů (místní nesymetrie příčná) nebo přerušením fází (místní nesymetrie podélná).

Poruchy charakteru místní nesymetrie v elektrizační soustavě lze modelovat zapojením obecného nesymetrického příčného či podélného článku v daném místě.[1]



Obr. 13 Zapojení příčného symetrického článku [12]



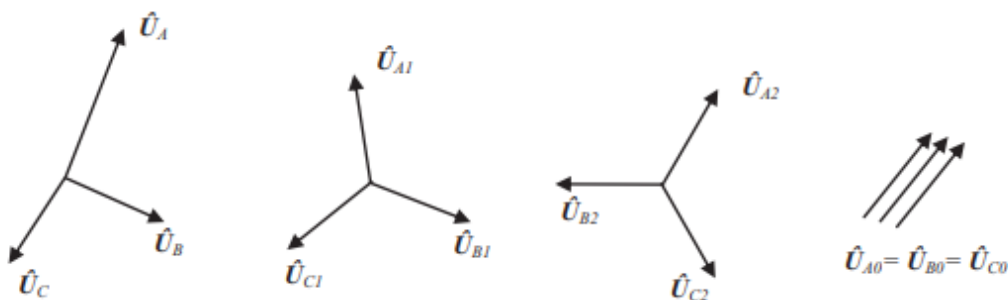
Obr. 14 Zapojení podélného symetrického článku [12]

1.5.1 Souměrné složky parametrů vedení [10]

Pro analýzu nesymetrických stavů v elektrizační soustavě a výkonových systémech je využívána metoda souměrných složkových soustav, která vychází ze superpozice nesouměrnosti napětí a proudů převodem na tři souměrné třífázové soustavy; sousledné, zpětné a netočivé. Nesymetrie je tedy nahrazena vhodným zapojením složek sítě, které na řešeném typu poruchy závisí.[9]

Metodu rozkladu nesymetrických soustav na souměrné složky formuloval v roce 1918 Charles Legeyt Fortescue a vychází, jak už bylo zmíněno, z existence tří souměrných složkových soustav.

- Soustavy sousledné (synchronní) se stejným sledem fází
- Soustavy zpětné (inverzní) s opačným sledem fází
- Soustavy netočivé (nulové)



Obr. 15 Vizualizace nesymetrické soustavy, sousledné, zpětné a netočivé složky [14]

Pro souslednou složku platí:

$$\underline{U}_1 = \frac{\underline{U}_U + a\underline{U}_V + a^2\underline{U}_W}{3} \quad (5)$$

Pro zpětnou složku:

$$\underline{U}_2 = \frac{\underline{U}_U + a^2\underline{U}_V + a\underline{U}_W}{3} \quad (6)$$

Pro složku netočivou:

$$\underline{U}_0 = \frac{\underline{U}_U + \underline{U}_V + \underline{U}_W}{3} \quad (7)$$

Ve vztazích pro výpočet sousledné a zpětné souměrné složky se vyskytuje matematický operátor **a**, který reprezentuje komplexní jednotku úhlového natočení jednotlivých fází (120° a 240°).

$$a = e^{j\frac{2\pi}{3}} = -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2} \quad (8)$$

$$a^2 = e^{j\frac{4\pi}{3}} = -\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2} \quad (9)$$

Zpětná transformace ze složkového tvaru na původní soustavu se provádí následovně.

$$\underline{U}_U = \underline{U}_0 + \underline{U}_1 + \underline{U}_2 \quad (10)$$

$$\underline{U}_V = \underline{U}_0 + a^2\underline{U}_1 + a\underline{U}_2 \quad (11)$$

$$\underline{U}_W = \underline{U}_0 + a\underline{U}_1 + a^2\underline{U}_2 \quad (12)$$

Předchozí transformační rovnice můžeme pro lepší přehlednost převést do maticového tvaru.

$$[\underline{U}] = \begin{bmatrix} \underline{U}_U \\ \underline{U}_V \\ \underline{U}_W \end{bmatrix} \quad [\underline{U}_F] = \begin{bmatrix} \underline{U}_U \\ \underline{U}_V \\ \underline{U}_W \end{bmatrix} \quad [F] = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \Rightarrow [\underline{U}] = [F] \cdot [\underline{U}_F] \quad (13)$$

Tímto způsobem je možné sepsat rovnice pro proud a impedance, a tedy celý nesymetrický obvod.

Pro nesouměrnou soustavu:

$$[\underline{U}_{UVW}] = [\underline{Z}_{UVW}] \cdot [\underline{I}_{UVW}] \quad (14)$$

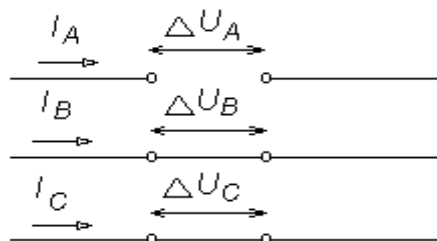
Pro náhradní složkovou soustavu:

$$[\underline{U}_{012}] = [\underline{Z}_{012}] \cdot [\underline{I}_{012}] \quad (15)$$

1.6 Přerušení jedné fáze [1]

Poruchu typu přerušení jedné fáze lze nahradit zapojením nesymetrického článku v místě poruchy, charakterizovaným úbytky napětí v jednotlivých fázích. Dle Obr. 16 můžeme zapsat charakteristické rovnice

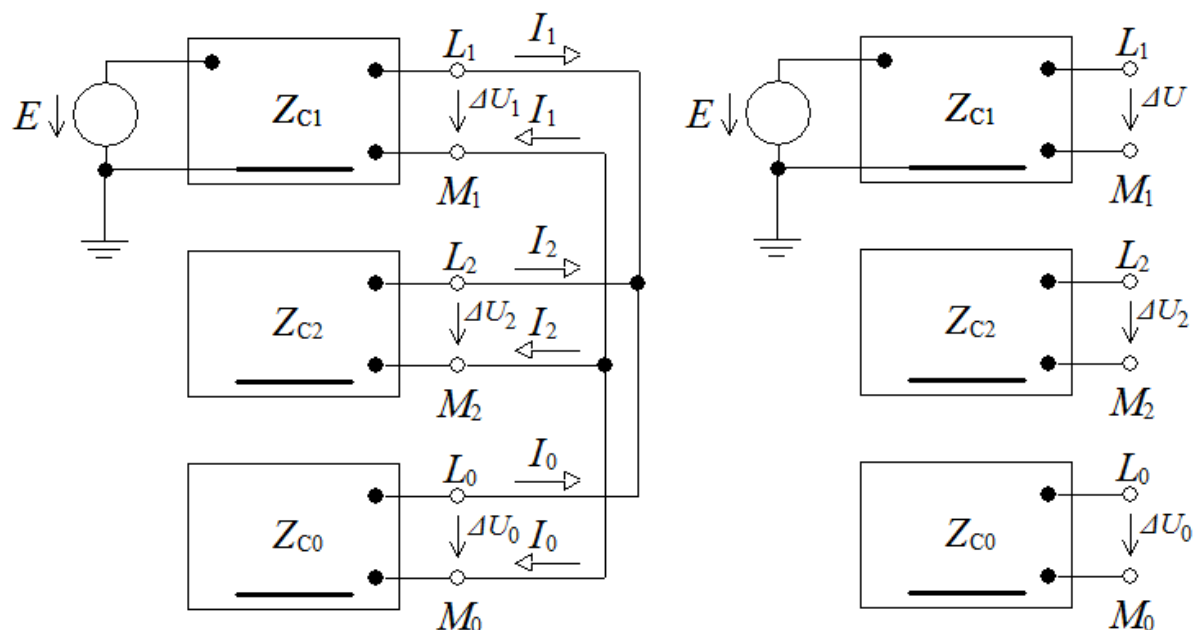
$$I_A = 0; \Delta U_B = 0; \Delta U_C = 0 \quad (16)$$



Obr. 16 Schématické znázornění přerušení jedné fáze [12]

Dle lit. [1] je rovnice (16) při porovnání s charakteristickými rovnicemi pro dvoufázový zemní zkrat formálně shodná. Lze proto psát, že

$$\Delta U_1 = \Delta U_2 = \Delta U_0 = \frac{1}{3} \Delta U_A \quad (17)$$



Obr. 17 Náhradní schémata složkových soustav při přerušení fáze [1]

Pro zjednodušení jsou zdroje ve schématu nahrazeny jedním ekvivalentním s vnitřním napětím E . Zároveň je na obrázku provedeno propojení složkových schémat.

a) *Složkové veličiny*

Z náhradního schématu na Obr. 17 je stanovíme vzorec pro sousledný proud. Zpětný a netočivý proud je pak odvozen pomocí předpisu pro proud sousledný.

$$I_1 = \frac{E}{Z_{c1} + \frac{Z_{c2} \cdot Z_{c0}}{Z_{c2} + Z_{c0}}} = \frac{E}{Z_{c1} + Z_{\Delta}} \quad (18)$$

$$I_2 = -\frac{Z_{c0}}{Z_{c2} + Z_{c0}} \cdot I_1 \quad (19)$$

$$I_0 = -\frac{Z_{c2}}{Z_{c2} + Z_{c0}} \cdot I_1 \quad (20)$$

Pro napětí zpětné složkové soustavy platí:

$$\Delta U_2 = -Z_{c2} \cdot I_2 = \frac{Z_{c2} \cdot Z_{c0}}{Z_{c2} + Z_{c0}} \cdot I_1 \quad (21)$$

b) *Fázové veličiny*

Vzorce pro úbytky fázových veličin získáme lineární transformací složkových proudů a úbytků napětí

$$[\Delta U] = [F] \cdot [\Delta U_F] = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ a^2 & a & 1 \\ a & a^2 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta U_1 \\ \Delta U_2 \\ \Delta U_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta U_1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (22)$$

$$[I] = [F] \cdot [I_F] = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ a^2 & a & 1 \\ a & a^2 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{1}{Z_{c0} + Z_{c2}} \\ -\frac{Z_{c0}}{Z_{c0} + Z_{c2}} \\ -\frac{Z_{c2}}{Z_{c0} + Z_{c2}} \end{bmatrix} \cdot I_1 = \begin{bmatrix} \frac{(a^2 - 1)Z_{c2} + (a^2 - a)Z_{c0}}{Z_{c2} + Z_{c0}} \\ \frac{(a^2 - 1)Z_{c2} + (a - a^2)Z_{c0}}{Z_{c2} + Z_{c0}} \end{bmatrix} I_1 \quad (23)$$

Dosazením do rovnice (23) z rovnice (21) získáme vztahy pro úbytky napětí

$$\Delta U_A = 3 \cdot \frac{Z_{c2} \cdot Z_{c0}}{Z_{c2} + Z_{c0}} \cdot I_1; \Delta U_B = 0; \Delta U_C = 0 \quad (24)$$

1.7 Přepětí na hladině VN

Dle [5] je přepětí definováno jako jakékoliv napětí mezi fází a zemí nebo mezi fázemi, jehož amplituda přesahuje příslušnou velikost nejvyššího nominálního napětí. Jak už bylo zmíněno, při nedokonalém, neoprávněném či poruchovém odpojení jednoho ze tří instalovaných jednopólových odpojovačů vzniká v síti napěťová nesymetrie dosahující značných hodnot. Toto s sebou nese hned několik nežádoucích a potenciálně problematických efektů na zařízení instalovaná v postiženém úseku vedení.

Přepětí jako taková se mohou na vedení projevit jednak průrazem a následnou destrukcí svodičů přepětí nebo měřících transformátorů napětí, přeskoky na stožár přes izolátor, kterým jsou zavěšeny či jinak upevněny vodiče na sloupu či stožáru, vybavením přepěťových ochran a následným přerušením dodávky elektrické energie do postiženého úseku distribuční sítě apod. Všechny tyto projevy poruchy typu napěťové nesymetrie s sebou nesou dodatečné finanční výdaje na opravu a znovuvvedení postiženého úseku do provozu a je na místě zvážit náhradu za spolehlivější přístroj, zvláště pak na úsecích, které jsou náchylné na přerušení dodávky elektrické energie, specificky pak hlavní napájecí větve velkých obytných celků či průmyslových závodů. Z nedodání smluvené elektrické energie pak samozřejmě plynou reparace a pokuty. Norma [5] klasifikuje přepětí z hlediska jeho časového průběhu na následující[6]:

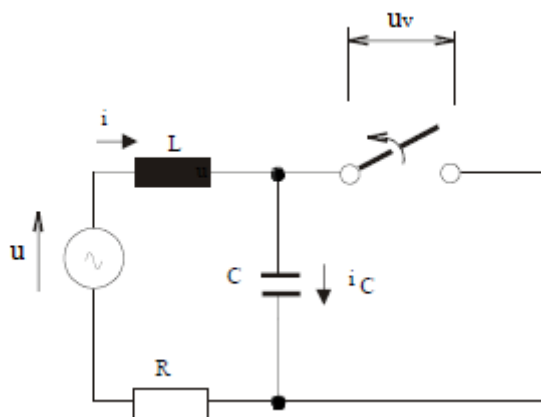
- **Trvalé přepětí**
 - Napětí síťového kmitočtu trvale přivedené ke dvojici svorek izolačního uspořádání, u kterého se efektivní hodnota považuje za konstantní.
- **Dočasné přepětí**
 - Přepětí síťového kmitočtu s delší dobou trvání.
- **Přechodné přepětí**
 - Krátkodobé, obvykle silně tlumené oscilační či neoscilační přepětí, s dobou trvání několika milisekund a méně.

1.8 Zotavené napětí [4]

Vzhledem k povaze poruchy výpadku FLRM odpojovače podobné přechodnému jevu při přerušení fáze, jej můžeme přirovnat k přechodnému ději vypínání střídavého proudu.

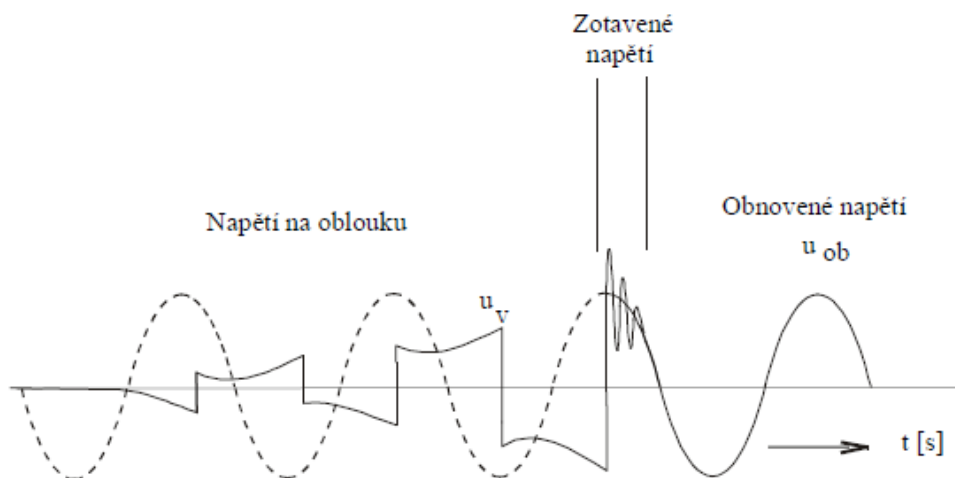
Zotaveným napětím chápeme napětí, které se objeví mezi kontakty vypínače bezprostředně po přerušení proudovodné dráhy, které má vyšší amplitudu, než napětí napájecí a kmitá s odlišnou frekvencí závislou na LC parametrech vypínaného obvodu. Sestává ze složky, nazývané tzv. obnoveným napětím (U_o), kmitajícím o frekvenci zdroje a přechodné složky o vyšší frekvenci.

Jako modelový případ pro popis vzniku a odvození zotaveného napětí je použit obvod na obr. 18, kdy se jedná o přerušení zkratu jednofrekvenčního obvodu.



Obr. 18 Přerušení zkratu [4]

V okamžiku přerušení obvodu spínačem vzniká obloukové napětí a při průchodu proudu nulou má oblouk vzniklý na kontaktech rozpojeného spínače tendenci přirozeně uhasínat, což ale způsobuje snahu obvodu obnovit energetickou vyváženost a proti snižující se hodnotě proudu narůstá obloukové napětí. Tento napěťový jev bývá nazýván zhasínací špičkou a špička dále narůstá s klesající hodnotou proudu. Zhasínací špička má snahu překmitnout na napájecí napětí u dodávané zdrojem, předbíhající proud o úhel φ . Obr. 19 znázorňuje průběh napětí na vypínači u_v od okamžiku odpojení až do ustálení na hodnotu obnoveného napětí u_{ob} .



Obr. 19 Průběh napětí na vypínači při přerušení obvodu [4]

Přechodná složka zotaveného napětí vzniká vyrovnáváním energie elektrického pole kapacit a energie magnetického pole indukčností. Působením tohoto fenoménu přechodná složka kmitá vlastním kmitočtem oscilačního obvodu a za předpokladu zanedbatelného odporu R vůči velikostem kapacity a indukčnosti soustavy můžeme zapsat výpočetní vztah pro vlastní kmitočet přechodné složky.

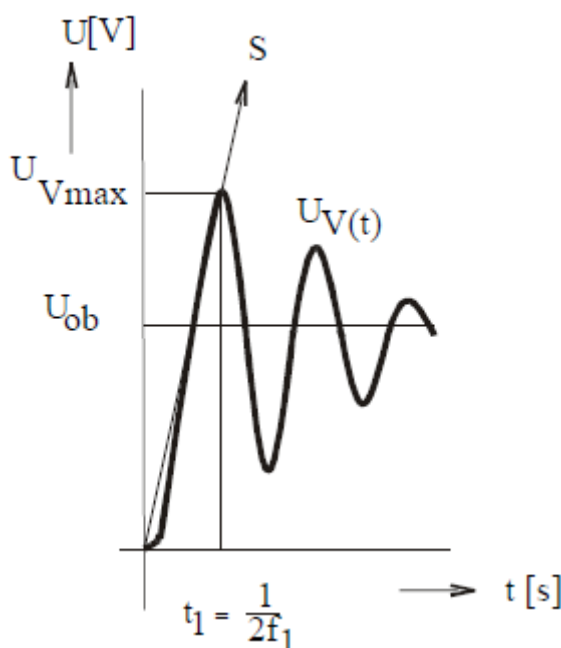
$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (25)$$

Vlastní kmitočet přechodné složky je jedním ze tří klíčových parametrů pro popis vlastností zotaveného napětí. Dalšími významnými parametry jsou pak strmost a překmit, kdy překmit značí poměr nejvyššího vrcholu zotaveného napětí $U_{V\max}$ ku obnovenému napětí U_{ob} .

$$p = \frac{U_{V\max}}{U_{ob}} \quad (26)$$

Strmost je pak směrnice křivky průběhu zotaveného napětí spojující počátek s vrcholem prvního kmitu (viz. Obr. 20).

$$s = \frac{U_{V\max}}{t} = 2f_0 U_{\max} = 2f_0 p U_{ob} \quad (27)$$



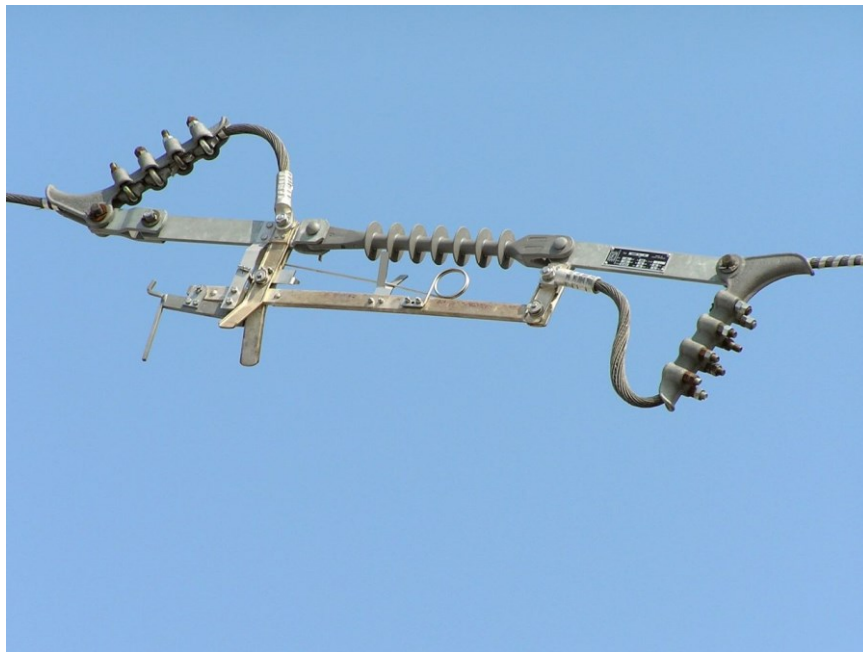
Obr. 20 Průběh zotaveného napětí jednofrekvenčního obvodu [4]

1.9 Odpojovač Flrm

Pod pojmem odpojovač rozumíme elektrický přístroj, sloužící k viditelnému rozpojení proudovodné dráhy manipulovaného úseku rozvodu či přenosu elektrické energie bez zatížení. V rozvodných zařízeních se odpojovače užívají převážně v trojpólové konfiguraci, v některých případech i jednopólové.

1.9.1 Popis a ovládání odpojovače typu Flrm výrobce DRIBO

Tyto typy odpojovačů jsou primárně určeny pro odpojování částí vedení **bez zatížení** a koncových trafostanic, jsou vybaveny jednoduchým zhášecím zařízením, které umožňuje vypínání nezávisle na rychlosti ovládání. Ovládání odpojovačů je manuální s užitím vypínací tyče.



Obr. 21 Jednopólový odpojovač typu Flrm DRIBO [2]

„Tahem ovládací tyče za horní hranu ovládací páky 6 (Obr. 22) dojde k rozevření aretačního mechanismu 5 a tím k uvolnění spínacího nože 1. Po uvolnění spínacího nože prochází proud paralelním zhášecím obvodem 15. Po dosažení vzdálenosti dostatečné pro bezpečné vypnutí dojde k mžikovému vypnutí, nezávislému na rychlosti ovládání. Dalším tahem dosáhne odpojovač vypnuté polohy (poloha svislá).“ [2]

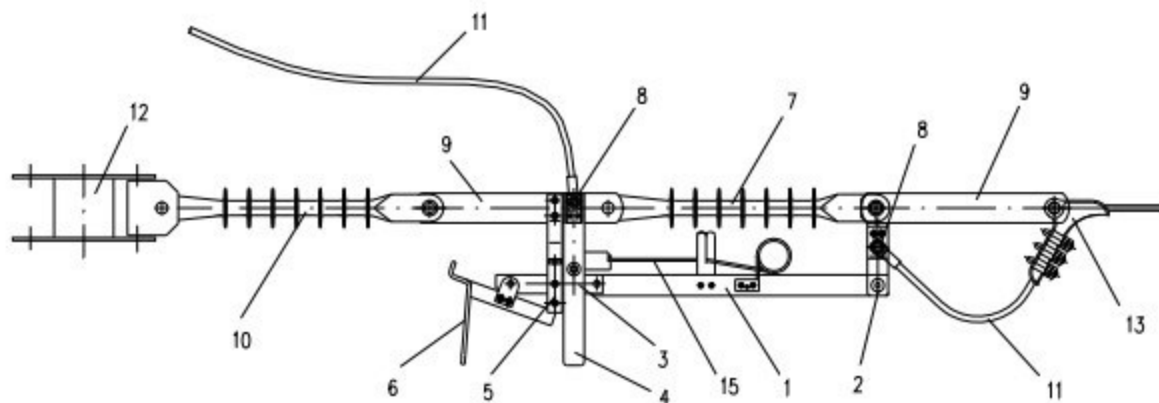


Obr. 22 Ilustrace rozpínání [2]

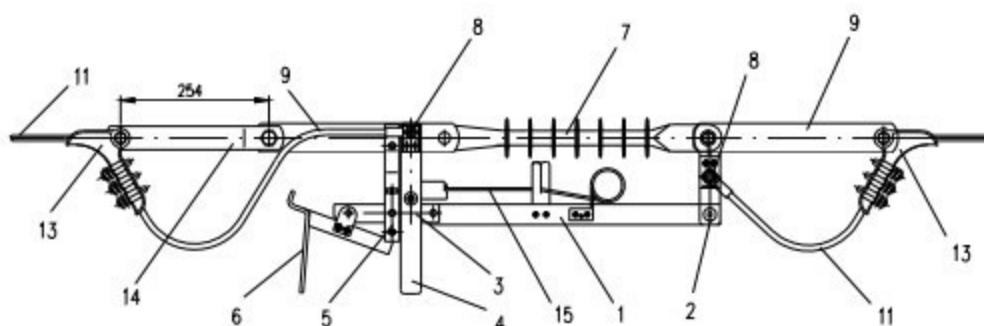


Obr. 23 Ilustrace zapínání [2]

„Tlakem ovládací tyče na spodní hranu ovládací páky 6 (Obr. 24) dojde k navedení spínacího nože 1 do naváděcí vidlice 4 a dále do suvného kontaktu 3. Po dosažení koncové polohy je spínací nůž 1 v zapnuté poloze zajištěn aretačním mechanismem 5. Během zapínání je aktivován vypínací mechanismus.“ [2]



Odpojovač Flrm-k na kotevním izolátoru



Odpojovač Flrm-v zavěšený v lanech

- | | | |
|------------------------|-----------------------|---------------------------------|
| 1 spínací nůž | 6 ovládací páka | 11 přívodní vodič |
| 2 otočný kontakt | 7 izolátor | 12 kotevní armatura |
| 3 suvný kontakt | 8 přívodní svorka M12 | 13 kotevní svorka |
| 4 naváděcí vidlice | 9 armatura | 14 prodloužení – vidlice s okem |
| 5 aretační mechanismus | 10 kotevní izolátor | 15 mřížkový mechanismus |

Obr. 24 Schématický náčrtek variant odpojovače Flrm [2]

Jmenovité napětí	U	kV	25
jmenovitý proud	I_r	A	400
jmenovitý krátkodobý proud	I_k	kA	16
jmenovitý dynamický proud	I_p	kA	40
dovolený provozní tah		kN	30
minimální fázová rozteč při umístění odpojovačů vedle sebe		mm	800
minimální fázová rozteč při mimoběžném umístění střední fáze		mm	500
jmenovité jednominutové krátkodobé výdržné střídavé napětí		kV	60
průmyslového kmitočtu za sucha i za deště v odpojovací dráze			
jmenovité výdržné napětí při atmosférickém impulsu v odpojovací dráze		kV	145

Obr. 25 Parametry odpojovače DRIBO FLRm [2]

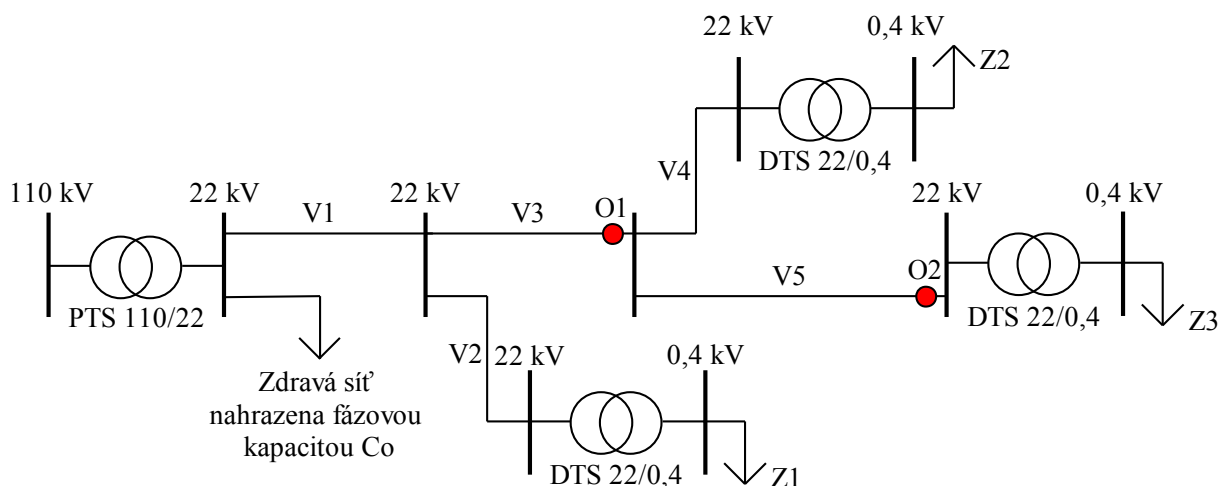
1.10 Problematika aplikace odpojovačů FLRM

1.10.1 Definice vyšetřovaného problému

Při zadání diplomové práce byla avizována firmou ČEZ distribuce definice problému, který nastal na napájecí lince Albrechtice - Kunčice. Ve své podstatě se jedná o přerušení fáze vyšetřovaným odpojovačem v úseku vedení. K neočekávanému odpojení fáze došlo po korektním servisním zásahu, při kterém elektromontéři při nezatíženém stavu úsek vedení odpojovačem přerušili, provedli potřebné práce a po ukončení činnosti vedení znovu pomocí odpojovačů připojili ke zbytku soustavy. Jeden z jednopólových odpojovačů však nebyl dokonale sepnut – nebyl řádně aretován. Působením atmosférických vlivů nebo elektrodynamických sil při průchozím zkratu pak došlo k jeho výpadku. Tato porucha měla za následek zvýšení fázového napětí na hodnotu napětí sdruženého a výše. Vlivem tohoto nežádoucího jevu může dojít a také došlo k poškození izolátorů, svodičů přepětí a měřících transformátorů, což s sebou nese dodatečné výdaje na obnovu funkce poškozené linky, zařízení v rozvodně, prodloužení předpokládané doby odstávky apod.

1.10.2 Modelovaná síť

Jedná se o vývod rozvodny Albrechtice, který napájí několik přilehlých obcí a průmyslových celků. Konkrétně část samotné obce Albrechtice, obec Horní Suchou, Prostřední Suchou, Lazy a obec Petřvald s koncovým směrem do rozvodny Kunčice. V přehledovém schématu, získaném z dispečinku společnosti ČEZ Distribuce jsou na této lince instalovány dvě soustavy jednopólových odpojovačů FLRM výrobce DRIBO Brno. Zjednodušené schéma je obecně shodné s konfigurací linky Albrechtice – Kunčice. Průmyslový rozvod a jednotlivé obecní rozvody jsou pak nahrazeny přívodním vedením, transformátorem 22/0,4 kV a obecnou zátěží typu impedance s induktivním charakterem se zvoleným průměrným účinníkem.



Obr. 26 Zjednodušené schéma vyšetřované síťové konfigurace

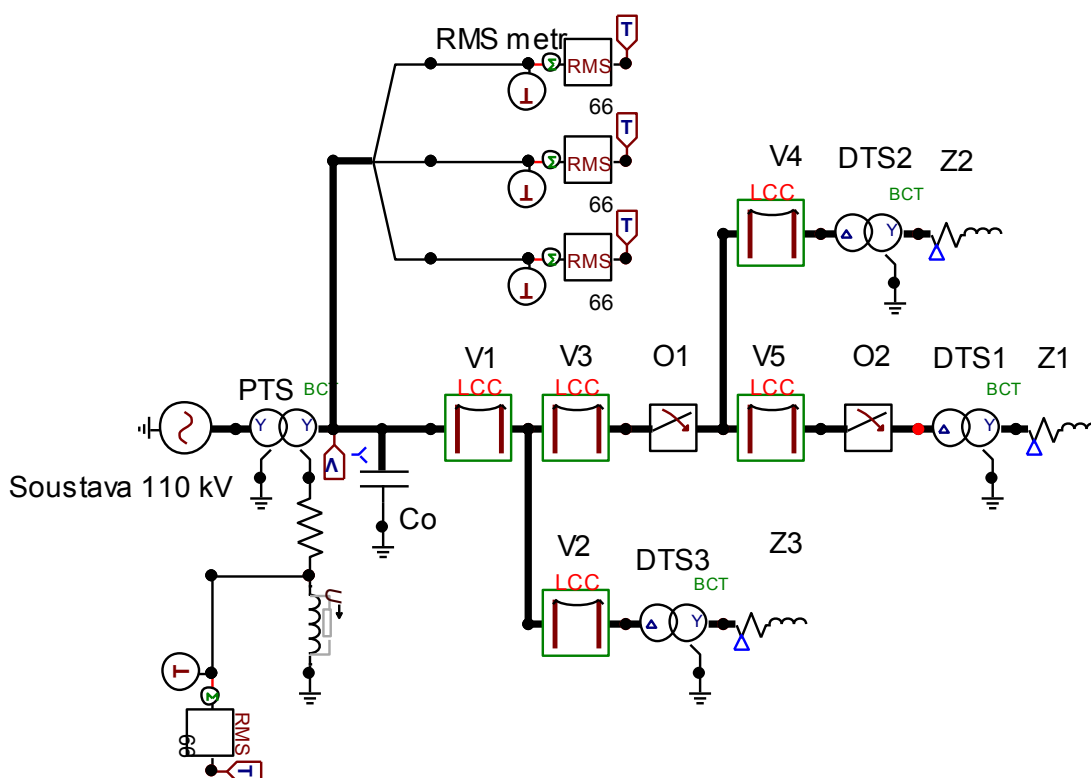
2. Model a simulace vybraných provozních stavů

2.1 Simulační program EMTP-ATP

ElectroMagnetic Transients Program – Alternative Transient Program je software vyvíjený a určený pro analýzu jak elektromagnetických, tak i elektromechanických přechodných dějů v elektrotechnice. Pro zjednodušení tvorby simulačních modelů a zadávání parametrů užitých prvků byl dále vyvinut grafický preprocesor ATPDraw, který nabízí jednoduché grafické uživatelské rozhraní a pro interpretaci simulačních výsledků byl implementován přídatný program PlotXY, který umožňuje vykreslení grafů klíčových veličin simulačních modelů.

2.2 Simulační model

Pro potřebu rekonstrukce a analýzy zadaného problému byl v programu EMTP-ATP vytvořen simulační model úseku sítě, na kterém vznikla a byla detekována porucha odpojovače FLRm. Pro zjednodušení celého simulačního modelu jsem provedl redukci na základní systém **nadřazená síť – rozvodna – paprsek – zátěž**. Zbytek kabelového a vzdušného rozvodu postranních odboček tvořící celkovou kapacitu vyšetřované sítě napájené rozvodnou byl nahrazen kapacitou v zapojení do hvězdy tak, aby kapacita korespondovala s podmínkou poruchových 100 A při zemním spojení.



Obr. 27 Simulační model

2.3 Skladba simulačního modelu

2.3.1 Nadřazená síť

Jako zdroj, resp. nadřazená síť je volen prvek typu trojfázového zdroje **AC source**, nastaven na hodnotu $U_s = 110 \text{ kV}$. Jedná se o ideální napěťový zdroj.

DATA	UNIT	VALUE
AmplitudeA	Volt	110000
Frequency	Hz	50
PhaseAngleA	degrees	-90
StartA	sec	-1
StopA	sec	1

NODE	PHASE	NAME
AC	ABC	X0001

Copy Paste Reset Order: 0 Label:

Comment:

Type of source: ☐ Current ☒ Voltage

Num phases: ☐ Single ☒ 3-phase ☐ 3*1-phase

Angle units: ☒ Degrees ☐ Seconds

Amplitude: ☐ Peak L-G ☐ RMS L-G ☒ RMS L-L

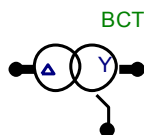
Grounding: ☒ Grounded ☐ Ungrounded

☐ Hide

Obr. 28 Konfigurace prvku AC source

2.3.2 Transformátory

Transformátory v modelu jsou simulovány prvkem typu **BCT**. Jehož předností je zejména fakt, že není třeba mít k dispozici nic jiného než štítkové údaje stroje, ze kterých si program dopočte ostatní potřebná data.



Obr. 29 Prvek BCT

Prvek transformátoru má představovat jednak vstupní přenosový transformátor na rozvodně, ze kterého jsou napájeny jednotlivé přípojnice a linky, kterými je výkon vyváděn do míst spotřeby a také distribuční transformátor, který mění napěťovou hladinu na NN, které je následně vedeno ke spotřebiteli. Na sekundární straně transformátoru je skrze vyvedený uzel zapojena Petersenova cívka, resp. kompenzační tlumivka spojená se zemnicím systémem transformátoru přes odpor, reprezentující činné ztráty ve vinutí tlumivky.

Tab. 1 Štítkové údaje transformátoru [7]

Označení	Výrobce	Typ	Převod	Zapojení	Výkon (MVA)	u_k (%)	i_0 (%)	ΔP_k (kW)	ΔP_0 (kW)
PTS	SIEMENS	Neuvedeno	110/22 kV	YNyn0/d5	10	9,6	3	42	13
DTS1	SIEMENS	TUNORMA	22/0,4 kV	D/Y	1	6	4	13	1,7
DTS2	SIEMENS	TUNORMA	22/0,4 kV	D/Y	1	6	4	13	1,7
DTS3	SIEMENS	TUNORMA	22/0,4 kV	D/Y	1	6	4	13	1,7

The screenshot displays the BCTRAN software interface for transformer configuration. It is divided into several sections:

- Structure:** Number of phases (3), Number of windings (2), Type of core (Other), Test frequency [Hz] (50), and a checked box for AR Output.
- Ratings:** HV and LV ratings. L-L voltage [kV] (110, 22), Power [MVA] (10, 10), Connections (Y, Y), Phase shift [deg] (0), and a checkbox for Ext. neutral connections.
- Factory tests:** Two tabs for 'Open circuit' and 'Short circuit' tests. Both show results for 'positive sequence'.
 - Open circuit test:** Performed at LV, Connect at LV. Results: Volt (%) 100, Curr (%) 3, Loss (kW) 13.
 - Short circuit test:** Results: Imp. (%) 3, Pow. (MVA) 10, Loss (kW) 42.
- Positive core magnetization:** Radio buttons for 'Linear internal' (selected) and 'External Lm'.
- Order:** 0, Label: (empty), and a 'Hide' checkbox.
- Comment:** (empty text area).

Obr. 30 Konfigurace prvku BCTRAN

Dimenzování tlumivky

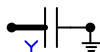
Na základě domluvy se zadavatelem práce byl zaveden jediný obecný předpoklad pro nastavení kompenzační tlumivky, a nýbrž hodnota poruchového kapacitního zemního proudu, na který má být tlumivka dimenzována. Hodnota zemního kapacitního proudu $I_p=100$ A. Na základě tohoto proudu byla dopočtena síťová fázová kapacita a následně indukčnost kompenzační tlumivky.

$$I_p = 3\omega C_0 U_f \Rightarrow C_0 = \frac{I_p}{3\omega U_f} = \frac{100}{3 \cdot 2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot \frac{22000}{\sqrt{3}}} \cong 8,35 \mu F \quad (28)$$

$$L = \frac{1}{3\omega^2 C_0} = \frac{1}{3 \cdot (2 \cdot \pi \cdot 50)^2 \cdot 8,3535 \cdot 10^{-6}} \cong 404,3 \text{ mH} \quad (29)$$

2.3.3 Náhradní kapacita sítě

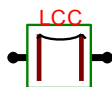
Vzhledem k povaze vyšetřované poruchy a snaze přiblížit model k realitě bylo nutné provést v simulačním modelu náhradu zbytku sítě, tvořící celkovou kapacitu kapacitou náhradní z důvodu redukce rozsahu simulačního modelu jako takového. Rekonstrukce kompletní síťové konfigurace dle přehledových schémat dispečinku společnosti ČEZ by byla přílišně rozsáhlá. Proto byl zbytek sítě nahrazen pouhou provozní kapacitou, kterou reprezentuje prvek **RLC-Y 3-ph** s uzlem spojeným se zemí. Hodnota fázové kapacity C_0 viz. Rovnice (28).



Obr. 31 Prvek RLC-Y 3-ph

2.3.4 Vedení

Pro model venkovního vedení VN byl použit prvek typu **LCC template**. Jedná se o šablonu, kterou lze upravit dle potřeby na jakoukoliv konfiguraci venkovního či kabelového vedení společně s různými variantami výpočetních metod, volených na základě povahy vyšetřované problematiky. Pro řešený případ užívám výpočetní metodu nahrazením vedení II článkem. V modelu je použito pět těchto prvků, představujících jednotlivé úseky z celkového přehledového schématu simulovaného paprskového vývodu z rozvodny. Úsekům jsou přiřazeny modelové délky a jsou uspořádány dle obdržené přehledové dokumentace, jež byla zjednodušená energetickým přehledovým schématem (viz. Obr. 26).



Obr. 32 Prvek typu LCC template

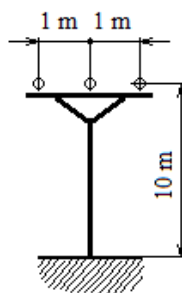
Obr. 33 Konfigurace prvku LCC template

	Ph.no.	React	Rout	Resis	Horiz	Vtower	Vmid
#		[ohm/km AC]	[cm]	[ohm/km AC]	[m]	[m]	[m]
1	1	0.383	0.472	0.431	1	10	10
2	2	0.383	0.472	0.431	0	10	10
3	3	0.383	0.472	0.431	-1	10	10

Obr. 34 Parametry vedení

Typ vodiče byl vybrán na základě směrnic společnosti ČEZ Distribuce [8]. Zvolil jsem holé lano typu AlFe 70/11-1 jehož základní parametry jsem získal z databáze programu BIZON projektant EDU. Parametry byly zadány do konfigurační tabulky (viz. Obr. 34), kde **React** je ekvivalentem X_k , **Rout** značí vnější poloměr vodiče, **Resis** je ekvivalentem R_k , **Horiz** udává rozmístění vodičů v horizontální ose, **Vtower** udává výšku zavěšení a **Vmid** průřez vodičů v nejnižším bodě, který je ale v tomto případě zanedbán, a proto stejný jako **Vtower**. Typ vodiče je stejný pro všech 5 modelů úseků vedení v simulačním schématu, délky jednotlivých úseků jsou uvedeny v tabulce pod textem.

Označení	V1	V2	V3	V4	V5
Délka (km)	5	2	3	10	20



Obr. 35 Rozmístění vodičů [12]

2.3.5 FLR odpojovač

Odpojovače v modelu představují trojfázové, časově nastavitelné prvky vypínače typu **Switch time 3 – f**, kdy jsou tyto vypínače umístěny v klíčových místech síťové konfigurace tak, aby bylo možné vysledovat vlivy vyšetřované poruchy v závislosti na místě vzniku. Vzhledem k tomu, že k výpadku odpojovače došlo za běžného provozu, byla nastavena hodnota parametru I_{mar} na hodnotu **200 A**. Parametr I_{mar} udává podmínku odpojení, kdy absolutní hodnota okamžitého proudu musí být menší než nastavená hodnota parametru I_{mar} . V jednotlivých případech jsou vypínány odpojovače v místech **O1**, **O2** (viz. Obr. 26).



Obr. 36 Prvek typu Switch time 3-f

Attributes		
DATA	UNIT	VALUE
T-cl_1	s	-1
T-op_1	s	0.05
T-cl_2	s	-1
T-op_2	s	1000
T-cl_3	s	-1
T-op_3	s	1000
Imar	Amps	200

Obr. 37 Konfigurace prvku Switch time 3-f

2.3.6 Zátěž

Vzhledem k povaze poruchy, je nutné přidat do simulačního modelu i prvek zátěže zapojené do Δ kvůli uzavírajícím se napětím a proudům. K tomuto účelu byl vybrán prvek **RLC-D 3-ph**, navržený tak, aby byl v součtu přenášen celkový výkon ekvivalentní přibližně **20%** S_n přenosového transformátoru 110/22 kV.



Obr. 38 Prvek typu RLC-D 3-ph

$$S_n = 10 \text{ MVA} \Rightarrow S_{n20\%} = 2 \text{ MVA} \Rightarrow \frac{1}{3} S_{n20\%} = S_z = 0,667 \text{ MVA} \quad (30)$$

$$I = \frac{S_z}{\sqrt{3} \cdot U} = \frac{0,667 \cdot 10^6}{\sqrt{3} \cdot 400} \cong 963 \text{ A} \quad (31)$$

$$Z = \frac{U}{I} = \frac{400}{963} \cong 0,4155 \, \Omega \quad (32)$$

Kde Z je obecná fázová impedance.

Pro zátěž Z_1 uvažuji průměrný účiník $\cos\varphi_1=0,9$.

$$Z_1 = R_1 + jX_{L_1} \quad (33)$$

$$R_1 = Z_1 \cdot \cos\varphi_1 = 0,4155 \cdot 0,9 = 0,374 \, \Omega \quad (34)$$

$$X_{L_1} = Z_1 \cdot \sin\varphi_1 = 0,4155 \cdot 0,4359 = 0,181 \, \Omega \quad (35)$$

Pro zátěž Z_2 uvažuji průměrný účiník $\cos\varphi_2=0,85$.

$$Z_2 = R_2 + jX_{L_2} \quad (36)$$

$$R_2 = 0,353 \, \Omega \quad (37)$$

$$X_{L_2} = 0,219 \, \Omega \quad (38)$$

Pro zátěž Z_3 uvažuji průměrný účiník $\cos\varphi_3=0,8$.

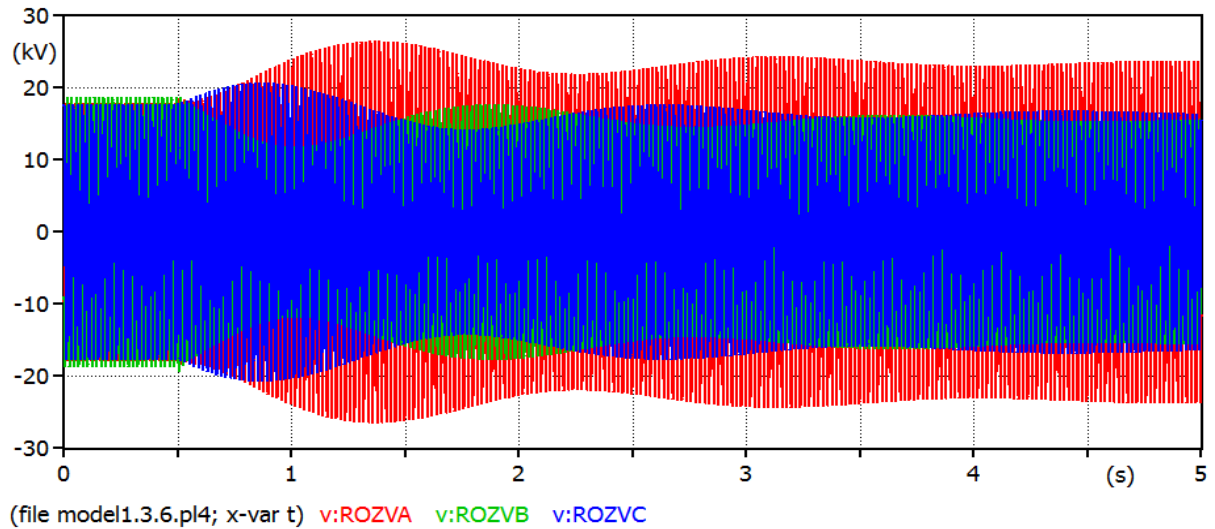
$$Z_3 = R_3 + jX_{L_3} \quad (39)$$

$$R_3 = 0,332 \, \Omega \quad (40)$$

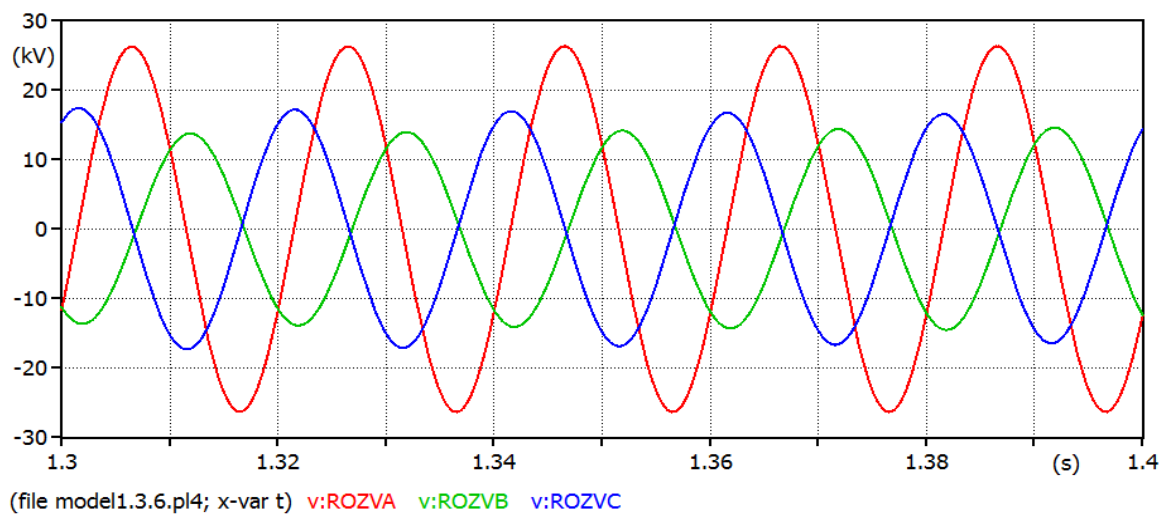
$$X_{L_3} = 0,249 \, \Omega \quad (41)$$

2.4 Výpadek FLRm odpojovače v místě O1

V čase $t = 0,5$ s bylo provedeno odpojení jedné fáze odpojovačem, situovaným ve vzdálenosti 8 km od rozvodny, tedy v místě **O1**. Přerušena je fáze s označením **A**, **červený průběh**. V tab. 2 je výčet amplitud napětí před vznikem a po vzniku poruchy měřených na úrovni vývodu z rozvodny, ze které vychází linka s instalovanými odpojovači.



Obr. 39 Časová závislost okamžitých hodnot napětí – porucha v O1

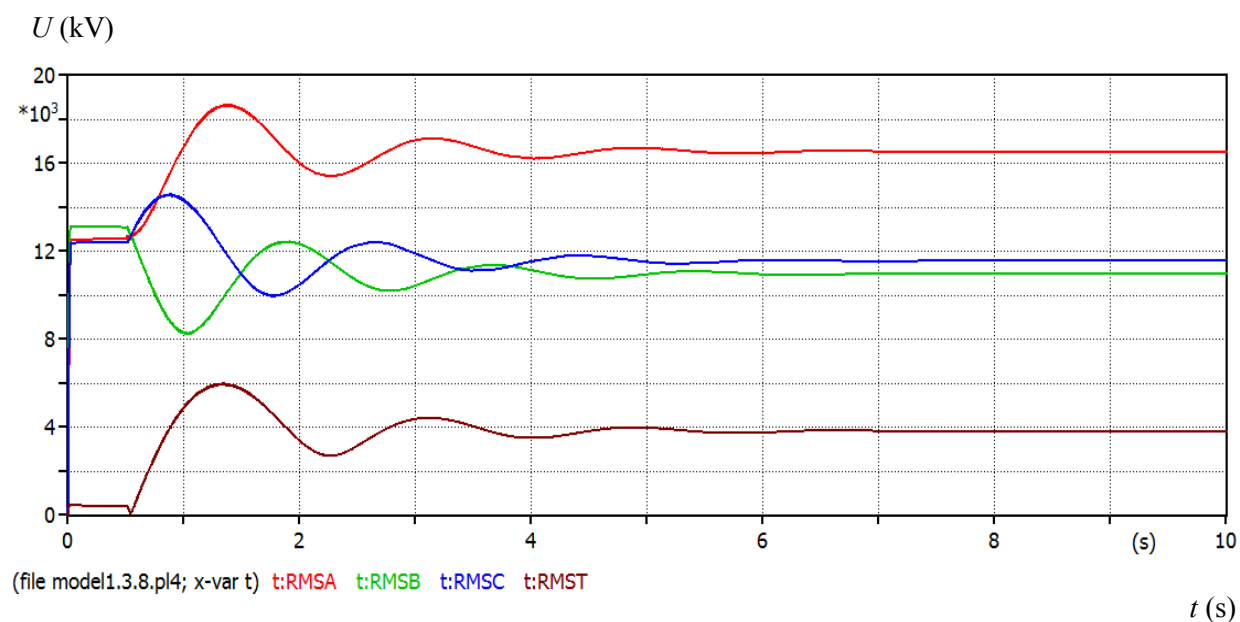


Obr. 40 Detail časové závislosti okamžitých hodnot napětí – porucha v O1

Tab. 2 Hodnoty amplitud napětí – rozvodna

	Fáze A		Fáze B		Fáze C	
	t (s)	U_m (kV)	t (s)	U_m (kV)	t (s)	U_m (kV)
Před poruchou	0,027	17,73	0,033	18,56	0,04	17,51
Při poruše	1,347	26,32	1,352	14,20	1,362	16,77

Obr. 41 ukazuje efektivní hodnoty měřené na úrovni rozvodny před a po vzniku poruchy, v tab. 3 je výčet ustálených efektivních hodnot napětí.



Obr. 41 Časová závislost efektivních hodnot napětí – porucha v O1

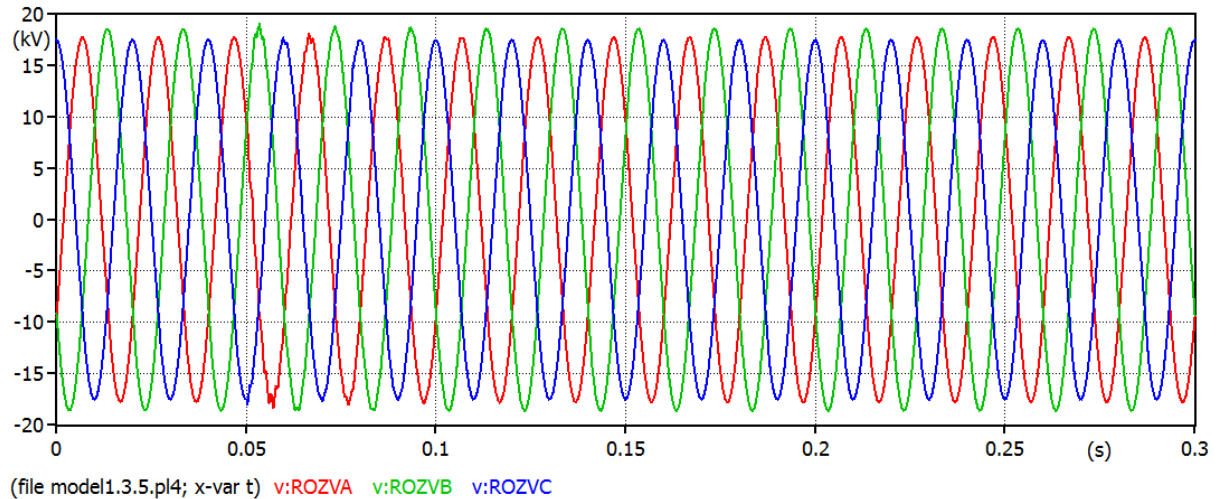
Tab. 3 Efektivní hodnoty napětí před a po vzniku poruchy

	Fáze A		Fáze B		Fáze C		U0	
	t (s)	U (kV)	t (s)	U (kV)	t (s)	U (kV)	t (s)	U (kV)
Před poruchou	0,040	12,54	0,040	13,12	0,040	12,38	0,040	0,452
Při poruše	1,384	18,63	1,384	10,22	1,384	11,75	1,384	5,920

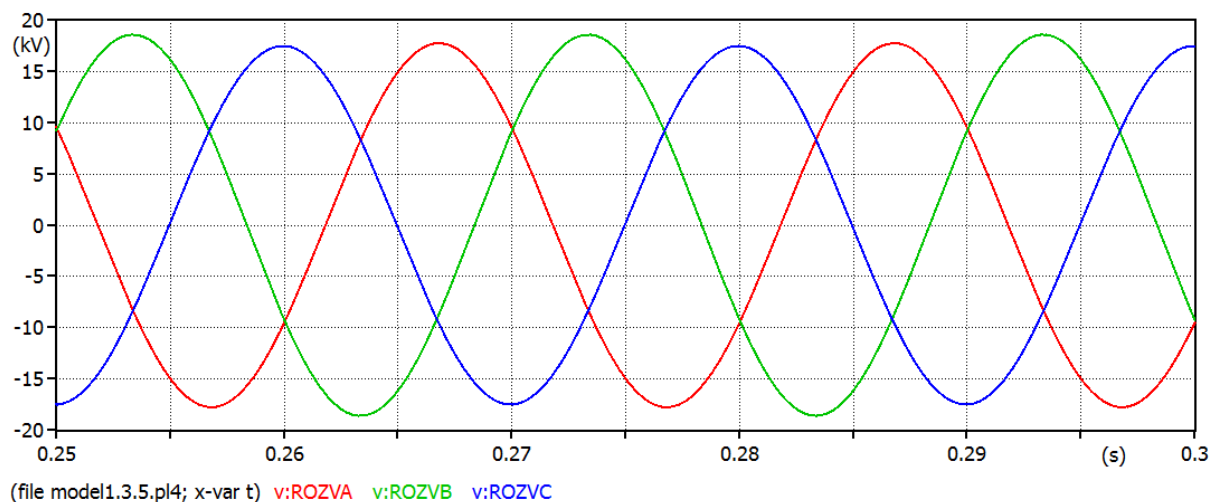
Z efektivních hodnot v tabulce byl sestrojen fázorový diagram viz. Příloha I.

2.5 Výpadek FLRm odpojovače v místě O2

Dalším provozním stavem považujeme výpadek v místě **O2** s jedním distribučním transformátorem na konci této větve (Obr. 27). Odpojení fáze nastává v čase $t = 0,05$ s.



Obr. 42 Časová závislost okamžitých hodnot napětí – porucha v O2

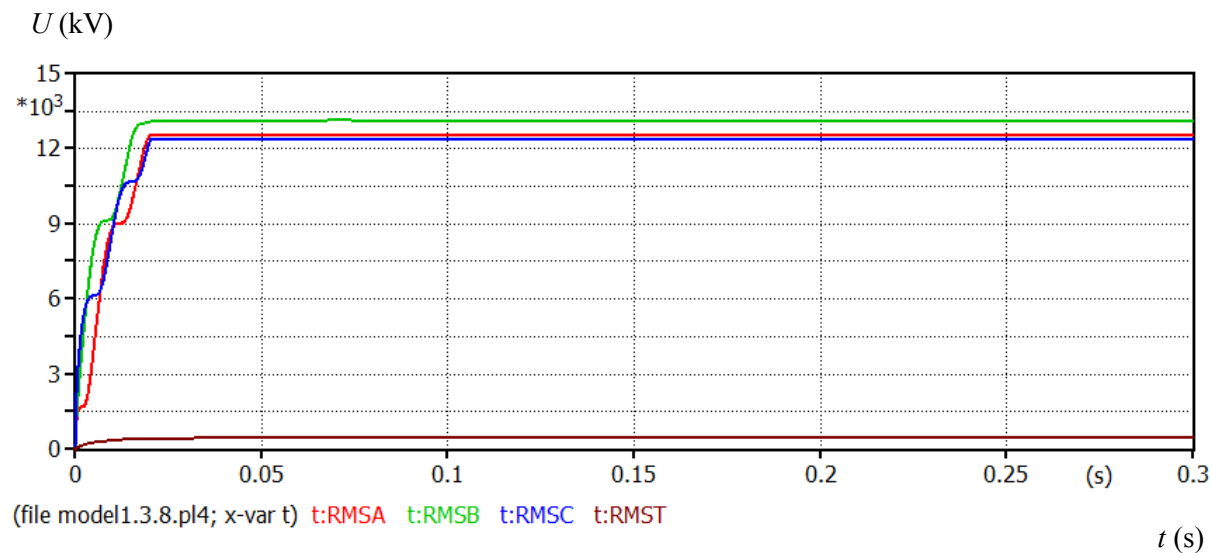


Obr. 43 Detail časové závislosti okamžitých hodnot napětí – porucha v O2

Tab. 4 Hodnoty amplitud napětí – porucha na konci vedení

	Fáze A		Fáze B		Fáze C	
	t (s)	U_m (kV)	t (s)	U_m (kV)	t (s)	U_m (kV)
Před poruchou	0,027	17,73	0,033	18,56	0,04	17,51
Při poruše	0,267	17,75	0,273	18,59	0,279	17,49

Obr. 44 znázorňuje časovou závislost efektivních hodnot napětí, měřených na úrovni rozvodny, při poruše typu přerušení fáze v místě **O2**, ve vzdálenosti 28 km od rozvodny, tedy na konci modelovaného vedení.



Obr. 44 Časová závislost efektivních hodnot napětí – porucha v O2

Tab. 5 Efektivní hodnoty napětí před a po vzniku poruchy

	Fáze A		Fáze B		Fáze C		U0	
	t (s)	U (kV)	t (s)	U (kV)	t (s)	U (kV)	t (s)	U (kV)
Před poruchou	0,040	12,54	0,040	13,12	0,040	12,38	0,040	0,452
Při poruše	0,2	12,56	0,2	13,15	0,2	12,37	0,2	0,453

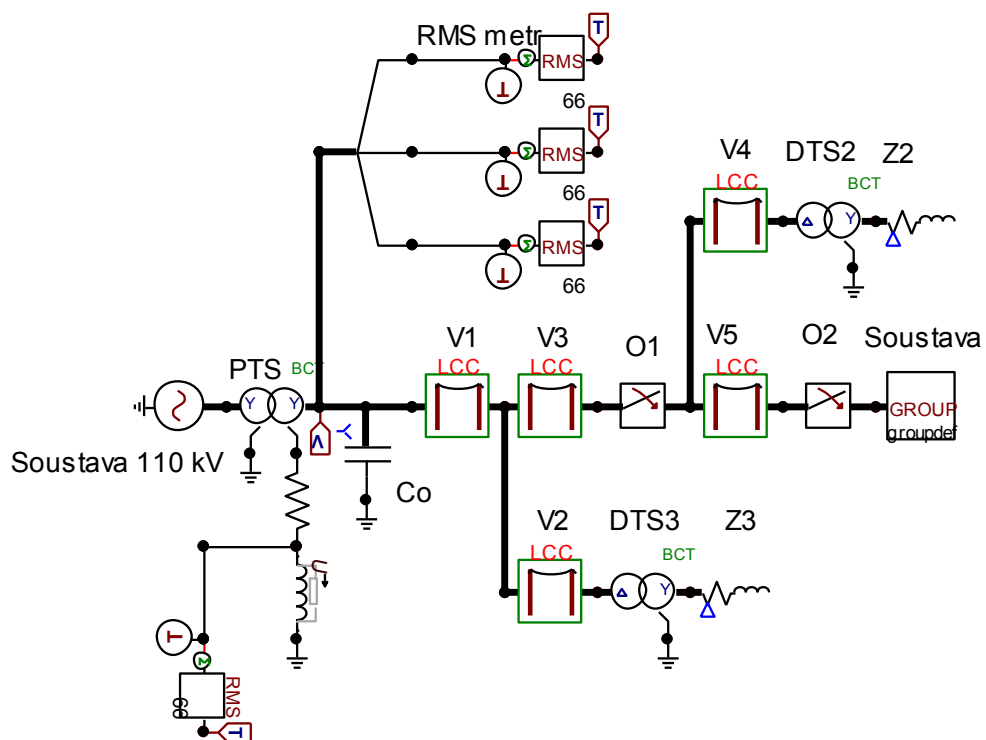
Z efektivních hodnot v tabulce byl sestrojen fázorový diagram viz.Příloha II.

2.6 Výpadek FLRm odpojovače v místě O1 – modifikace

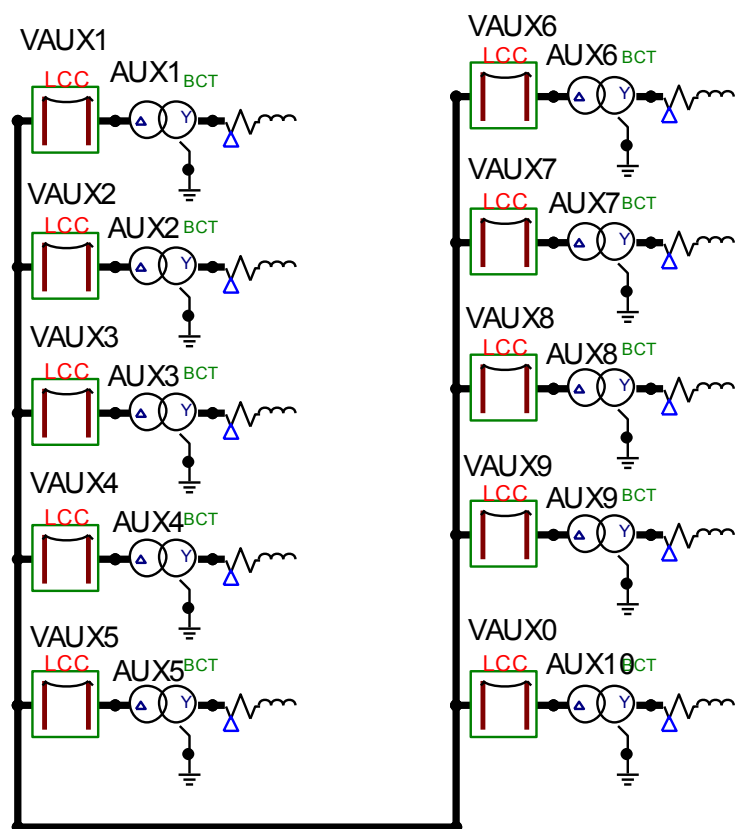
Z hlediska posouzení vlivu rozlohy napájené soustavy za poruchou bude v tomto případě na konci linky za vedením **V5** (Obr. 27), nahrazen jeden distribuční transformátor paralelní kombinací totožných transformátorů a zátěží s různými vzdálenostmi přívodního vedení. Celkový počet sub-větví **Vedení-DTS-Zátěž** činí 10 a jsou zredukovány do jednoho prvku typu **GROUP**.



Obr. 45 Prvek typu GROUP



Obr. 46 Upravené simulační schéma

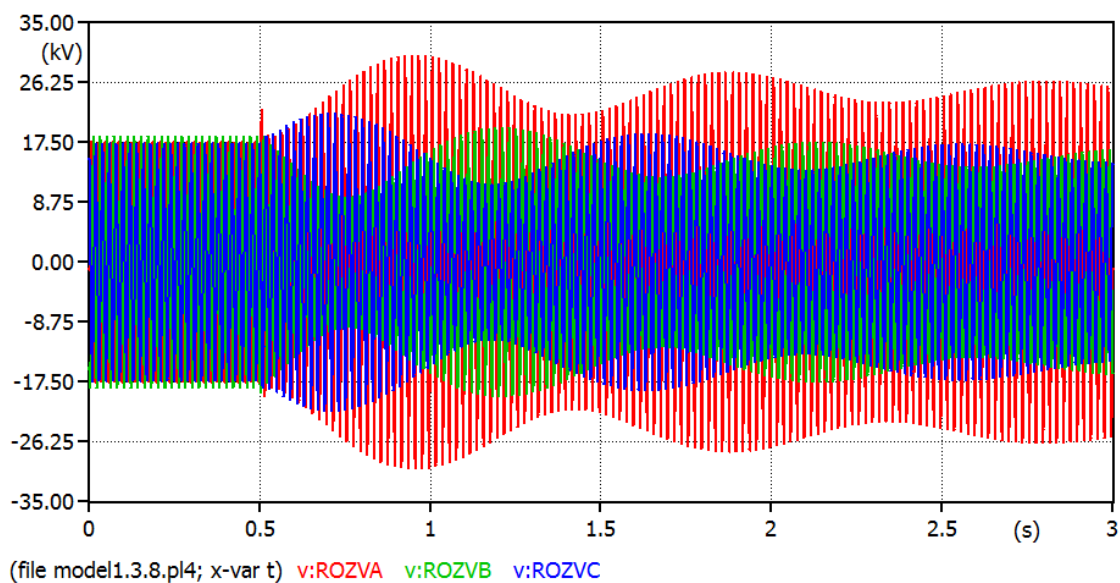


Obr. 47 Obsah prvku typu GROUP

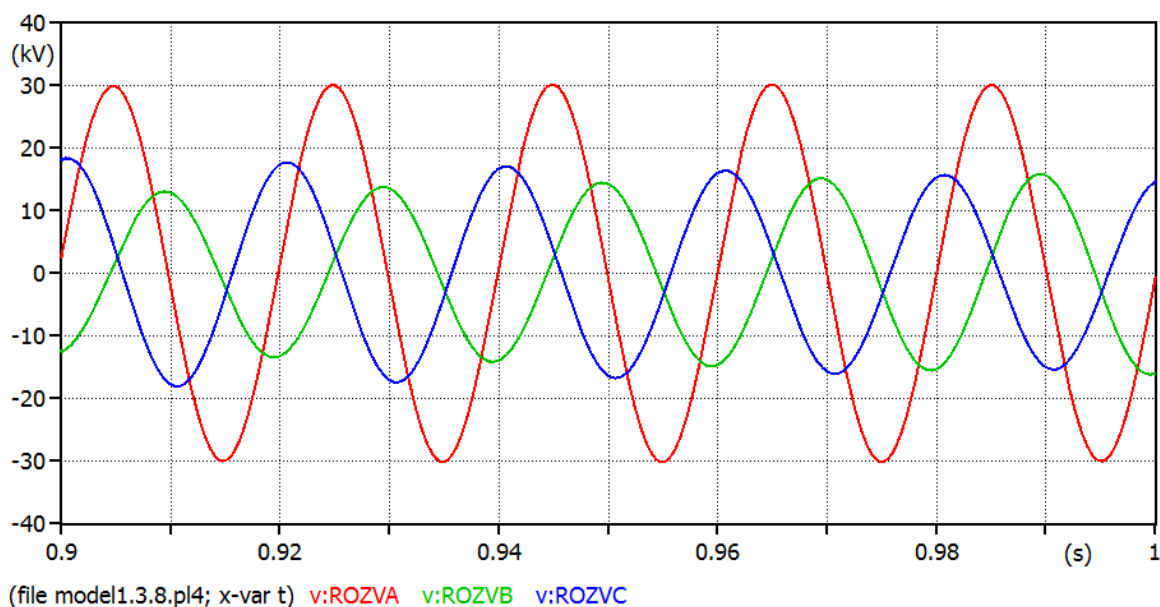
Transformátory použité v této soustavě jsou identické s transformátory 22/0,4 kV v Tab. 1. Vedení pak mají stejné parametry jako ostatní vedení použitá v simulaci (viz. Obr. 34), jejich délky jsou uvedeny v následující tabulce.

Označení	VAUX	VAUX	VAUX	VAUX	VAUX	VAUX	VAUX	VAUX	VAUX	VAUX
Délka (km)	3	1	2	4	10	7	6	3,5	3,5	5

Přerušeni nastává v čase $t = 0,5$ s ve vzdálenosti 8 km od rozvodny (O1), stejně jako v 2.4, ovšem s rozdílným poměrem kapacit síťové konfigurace před a za poruchou.



Obr. 48 Časová závislost okamžitých hodnot napětí – porucha v O1 (Modifikace)

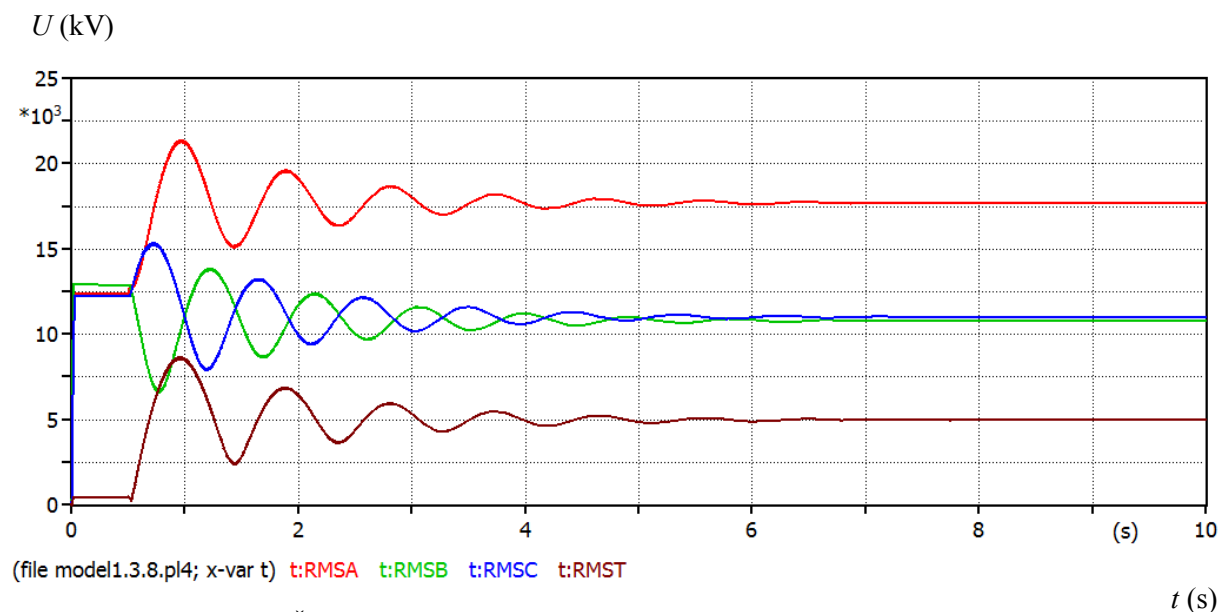


Obr. 49 Detail časové závislosti okamžitých hodnot napětí – porucha v O1 (Modifikace)

Tab. 6 Hodnoty amplitud napětí – porucha v O1 (Modifikace)

	Fáze A		Fáze B		Fáze C	
	t (s)	U_m (kV)	t (s)	U_m (kV)	t (s)	U_m (kV)
Před poruchou	0,025	17,49	0,031	18,28	0,038	17,31
Při poruše	0,925	30,06	0,929	13,78	0,941	17,08

Obr. 50 znázorňuje časovou závislost efektivních hodnot napětí, měřených na úrovni rozvodny, při poruše typu přerušení fáze v místě **O1**, ve vzdálenosti 8 km od rozvodny s modifikací napájené soustavy za vedením.



Obr. 50 Časová závislost efektivních hodnot napětí – porucha v O1 (Modifikace)

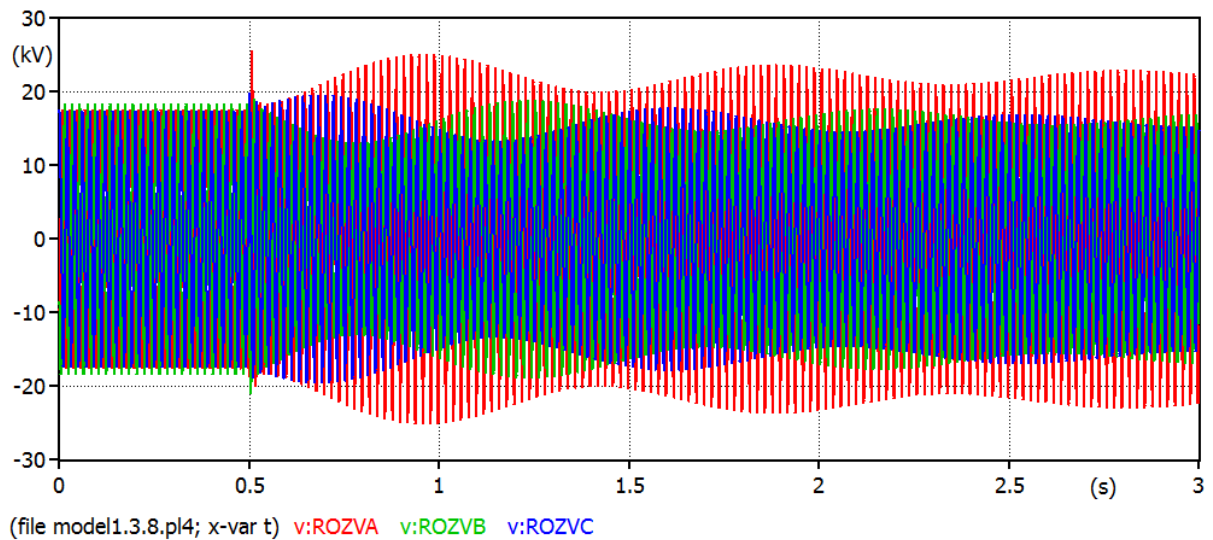
Tab. 7 Efektivní hodnoty napětí před a po vzniku poruchy

	Fáze A		Fáze B		Fáze C		U0	
	t (s)	U (kV)	t (s)	U (kV)	t (s)	U (kV)	t (s)	U (kV)
Před poruchou	0,040	12,37	0,040	12,93	0,040	12,24	0,040	0,422
Při poruše	0,95	21,35	0,95	10,01	0,95	12,11	0,95	8,634

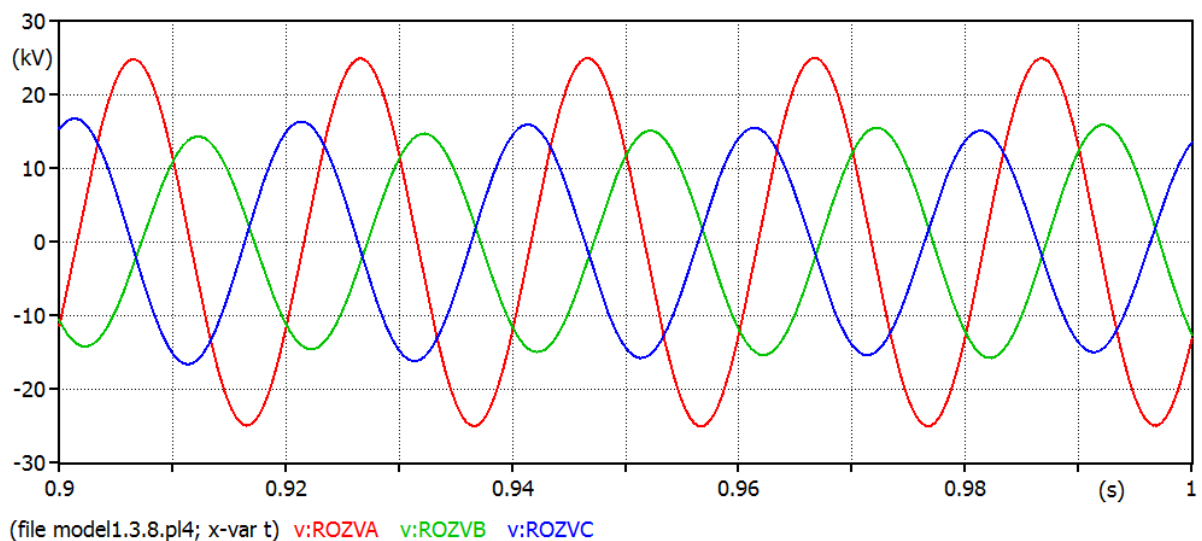
Z efektivních hodnot v tabulce byl sestrojen fázorový diagram viz.Příloha III.

2.7 Výpadek FLRm odpojovače v místě O2 – modifikace

Jako modifikace případu výpadku odpojovače v místě O2 je provedena stejná úprava jako v případě předchozím. Prerušení nastává v čase $t = 0,5$ s ve vzdálenosti 28 km od rozvodny, stejně jako v předchozím případě, ovšem s rozdílným poměrem kapacit síťové konfigurace před a za poruchou.



Obr. 51 Časová závislost okamžitých hodnot napětí – porucha v O2 (Modifikace)

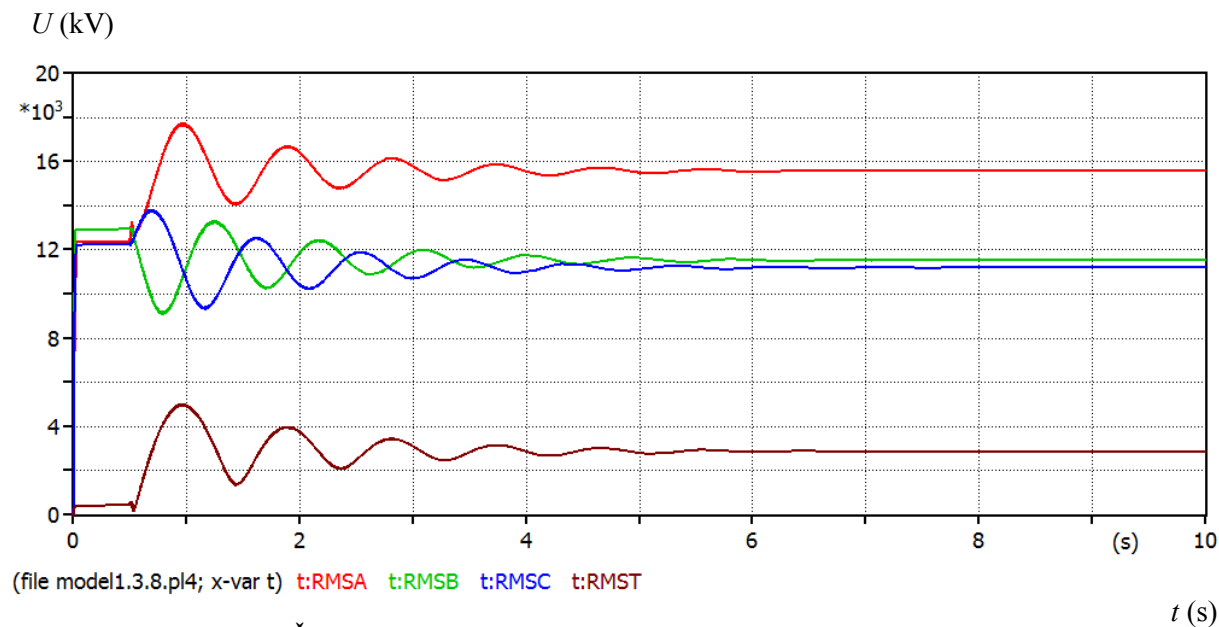


Obr. 52 Detail časové závislosti okamžitých hodnot napětí – porucha v O2 (Modifikace)

Tab. 8 Hodnoty amplitud napětí – porucha v O2 (Modifikace)

	Fáze A		Fáze B		Fáze C	
	t (s)	U_m (kV)	t (s)	U_m (kV)	t (s)	U_m (kV)
Před poruchou	0,027	17,49	0,033	18,28	0,04	17,30
Při poruše	0,927	24,95	0,932	14,74	0,941	15,97

Obr. 53 znázorňuje časovou závislost efektivních hodnot napětí, měřených na úrovni rozvodny, při poruše typu přerušení fáze v místě **O2**, ve vzdálenosti 28 km od rozvodny, tedy na konci modelovaného vedení s modifikací napájené soustavy za vedením.



Obr. 53 Časová závislost efektivních hodnot napětí – porucha v O2 (Modifikace)

Tab. 9 Efektivní hodnoty napětí před a po vzniku poruchy

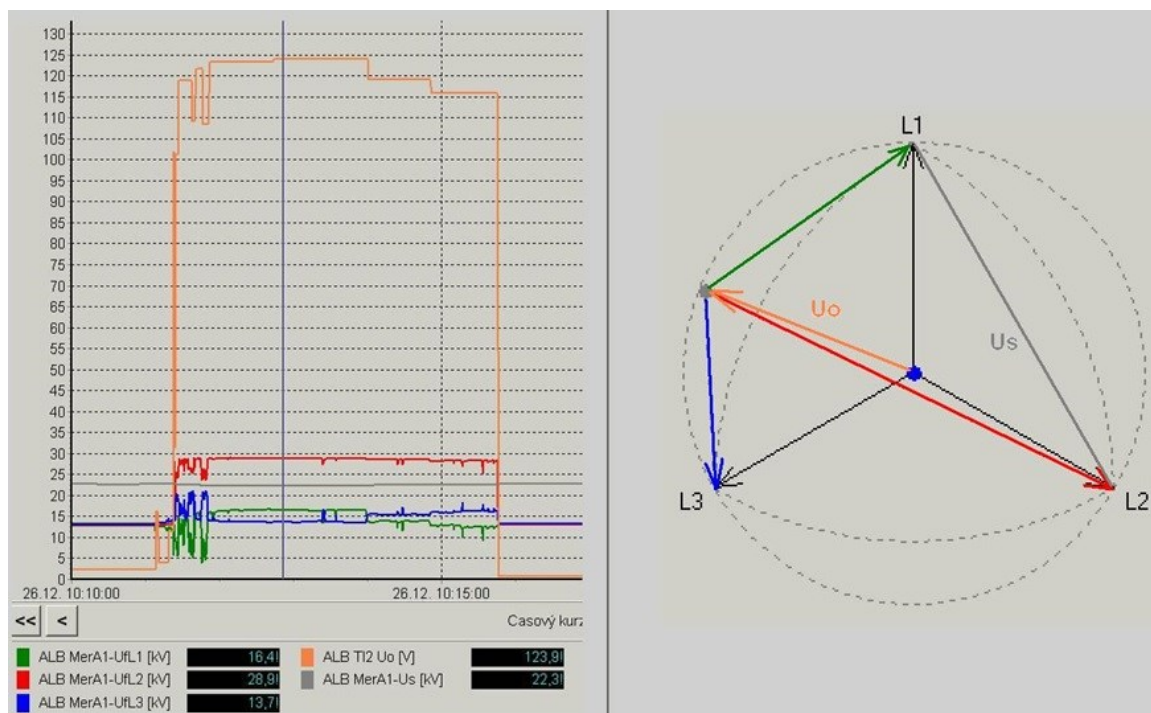
	Fáze A		Fáze B		Fáze C		U0	
	t (s)	U (kV)	t (s)	U (kV)	t (s)	U (kV)	t (s)	U (kV)
Před poruchou	0,040	12,37	0,040	12,93	0,040	12,24	0,040	0,422
Při poruše	0,963	17,70	0,963	10,73	0,963	11,10	0,963	4,990

Z efektivních hodnot v tabulce byl sestrojen fázorový diagram viz.Příloha IV.

3. Doporučení k provozu odpojovačů na základě provedených simulací

Dle provedených simulací byla zjištěna shoda se skutečnou poruchou, detekovanou v distribuční soustavě. Přepětí postižené fáze měřené na úrovni napájecí rozvodny je tím větší, čím větší je část sítě za poruchovým FLRm odpojovačem. Toto naznačuje vazbu mezi rozsahem sítě za poruchou v poměru k rozsahu sítě jako celku. Největší přepětí pak nastávají v malých sítích, jelikož síť za poruchou je pak poměrně velká.

Z výše uvedených důvodů má vzdálenost FLRm odpojovače, na kterém porucha vzniká, významný vliv. V případě výpadku v místě O1 (kap. 2.4) způsobil výpadek FLRm významné přepětí v postižené fázi na rozvodně. Tímto přepětím trpí zejména zařízení umístěná mezi fází a zemí, tzn. svodiče přepětí a PTN. Svodiče přepětí jsou varistory vyrobené na určitou změnu a strmost napětí při úderu blesku, nicméně přepětí způsobené výpadkem FLRm je „pomalé“. Svodič se částečně otevírá, zahřívá a po určité době dochází k jeho destrukci následované zemním spojením v postižené fázi a často i požárem. Modifikovaný výpadek v místě O1 (kap. 2.6) má rovněž nejbližší ke změřeným projevům poruchy v síti přibližně rekonstruované simulačním modelem.



Obr. 54 Výpadek FLR na lince Albrechtice – Kunčice

Na obrázku jsou zobrazeny průběhy efektivních hodnot napětí měřené na rozvodně Albrechtice, kdy vypadl FLRm odpojovač ve fázi s označením U_{fL2} (červený průběh). Charakterově je projev poruchy shodný s průběhy získanými simulací téměř u všech modelovaných případů, přičemž v modifikaci vzniku poruchy v bodě O1 (viz.2.6) byl tento projev nejpodobnější skutečnému detekovanému případu. Liší se však velikostmi efektivních hodnot napětí, což je způsobeno množstvím zjednodušení, která byla při tvorbě simulačního modelu provedena. Při sestavení simulačního modelu na základě kompletní dokumentace modelované sítě by bylo možné snížit tuto nepřesnost. Pro obecné porovnání charakteru

poruchy detekované ve skutečné síti s rekonstruovanou poruchou v simulačním modelu je však výsledek postačující (viz. Příloha III).

Výpadek FLRm v bodě O2 byl modelován pro dva případy, kdy je za poruchou buď jedna transformační stanice nebo soustava deseti trafostanic. V případě nemodifikovaného případu výpadku v O2 (kap. 2.5) tato podélná porucha neměla žádný či zanedbatelný vliv na napětí na rozvodně a dispečer ji bude provozovat tak dlouho, dokud zákazníci připojení na tuto DTS neohlásí na poruchovou linku poklesy napětí.

V případě modifikace výpadku v bodě O2 (kap. 2.6) je již znatelný vliv na napětí měřené na úrovni rozvodny. Mez napětí U_0 signalizující problém v soustavě je však nastavena na 30% U_f , což je nad úrovní napětí, které bylo na kompenzační tlumivce naměřeno. Dispečer tedy bude síť s poruchou provozovat dále, jelikož porucha nebude signalizována a fázová napětí nejsou trvale sledována.

V obou případech je za poruchou síť VN napájena po dvou fázích, které se transformují do tří fází NN se značnými poklesy a nesymetrií napětí. To má za následek například poruchy motorů NN bez tepelné pojistky.

Vypadnutý FLR nebo upálené přeponky jsou zdroji zemních spojení. Tato kombinace poruch je velice obtížně lokalizovatelná.

Doporučení pro provoz FLRm odpojovačů výrobce Dribo Brno na základě provedených simulací a zjištěných informací při konzultacích se společností ČEZ si dovolím shrnout do několika bodů:

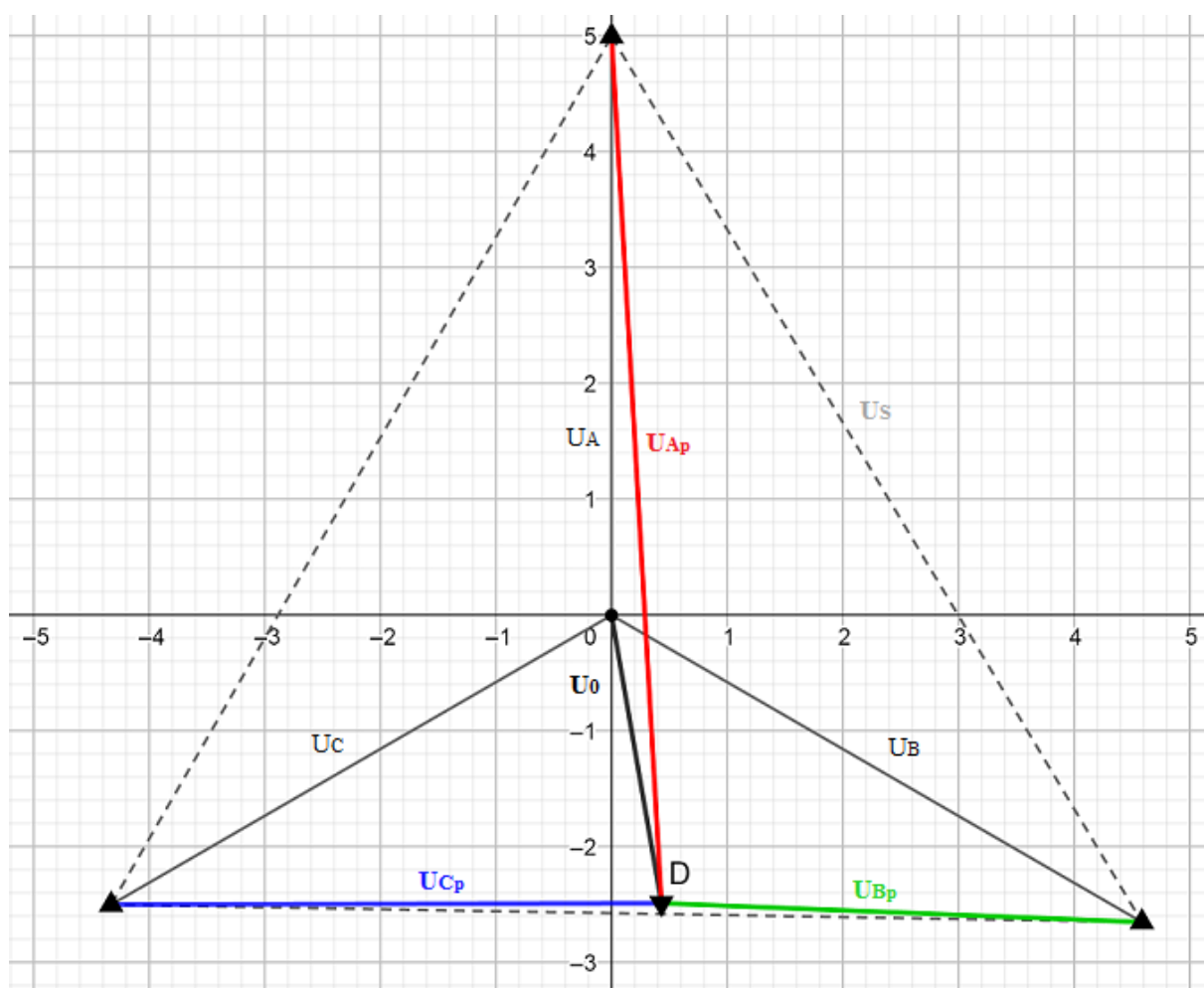
- 1) Důsledně dodržovat manuál pro zapínání, který nařizuje po sepnutí zkušební zatáhnutí za spínací nůž, který nesmí povolit.
- 2) Potenciální nové instalace systému jednopólových FLRm odpojovačů umisťovat pouze na koncové úseky vedení, na které nejsou připojeny další rozsáhlé sítě z důvodu snížení vlivu poměrových síťových kapacit před a za poruchou.
- 3) Zvážení náhrady systému jednopólových FLRm odpojovačů na kritických úsecích (kritickými úseky rozumějme páteřní linky distribučních sítí VN, úseky vedení napájející velké obytné oblasti a průmyslové celky) systémy odpojovačů trojpólových, u kterých se dá předpokládat vyšší odolnost vůči poruchám typu přerušení fáze vzniklých příčinami zmíněnými v kap. 1.10.1.
- 4) Optimalizace mechanické konstrukce jednopólových FLRm odpojovačů se zaměřením na aretační mechanismus.
- 5) Zvýšení frekvence doporučeného servisního intervalu jednopólových FLRm odpojovačů, jehož součástí je i kontrola aretačního mechanismu. Dle [2] je tento interval stanoven na 20 let provozu.

Seznam použité literatury

- [1] TROJÁNEK, Zdeněk, Josef HÁJEK a Pavol KVASNICA. *Přechodné jevy v elektrizačních soustavách: celostátní vysokoškolská učebnice pro elektrotechnické fakulty vysokých škol technických*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1987.
- [2] *Venkovní jednopólové odpojovače DRIBO Flrm* [online]. Brno, 2013 [cit. 2017-12-12]. Dostupné z: http://www.dribo.cz/pdf/CZ_Flrm.pdf
- [3] KREJČÍ, Petr. *Cvičení z elektroenergetiky*. Ostrava: VŠB - Technická univerzita, 2003. ISBN 80-248-0471-9.
- [4] HAVELKA, Otto. *Elektrické přístroje*. 2. nezm. vyd. Brno: VUT, 1974. Učební texty vysokých škol (Vysoké učení technické v Brně).
- [5] PNE 33 0000-8. *Navrhování a umisťování svodičů přepětí v distribučních sítích nad 1 kV do 45 kV*. 1. vydání. 2005.
- [6] TOMAN, Petr. *Provoz distribučních soustav*. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2011. ISBN 978-80-01-04935-8.
- [7] *Parametry vedení a transformátorů* [online]. [cit. 2018-02-12]. Dostupné z: http://fe1.vsb.cz/kat410/studium/studijni_materialy/katalogy/parametry.doc
- [8] *Technická politika – Rozvoj distribučních sítí a technologických prvků v DSO příloha č. 5 – Koncepce venkovních sítí VN* [online]. , 5 [cit. 2018-03-18]. Dostupné z: <http://www.cezdistribuce.cz/edee/content/file-other/distribuce/technicke-informace/priloha-5.doc>
- [9] *Přechodné jevy v elektrizačních soustavách - cvičení* [online]. [cit. 2018-03-25]. Dostupné z: <http://home.zcu.cz/~nohac/PJS/CviceniPJS2.pdf>
- [10] RUSEK, Stanislav. *Teoretická elektroenergetika*. Ostrava: VŠB-Technická univerzita, 1999. ISBN 80-707-8715-5.
- [11] *Přenos a rozvod elektrické energie - přednášky* [online]. [cit. 2018-04-10]. Dostupné z: http://fe1.vsb.cz/kat410/studium/studijni_materialy/pree/Prednasky_PREE_pdf.zip
- [12] *Přenosová vedení* [online]. [cit. 2018-04-10]. Dostupné z: <http://homen.vsb.cz/~mah30/pokrocily/html/4vedeni.html>
- [13] *Distribuční a průmyslové sítě* [online]. Brno [cit. 2018-04-17]. Dostupné z: http://www.ueen.feec.vutbr.cz/cz/images/stories/OPVK_ePower/MMEZ/Prezentace_MMEZ.pdf
- [14] VANĚK, Roman. *Problematika přechodových jevů souvisejících se zemním spojením v sítích 22 kV*. Ostrava: Vysoká škola Báňská - Technická univerzita Ostrava, 2006. Disertační práce. Vysoká škola Báňská - Technická univerzita Ostrava, Fakulta elektrotechniky a informatiky.
- [15] *Fault indicators* [online]. [cit. 2018-04-22]. Dostupné z: <https://www.streamer-electric.com/products/fault-indicators>

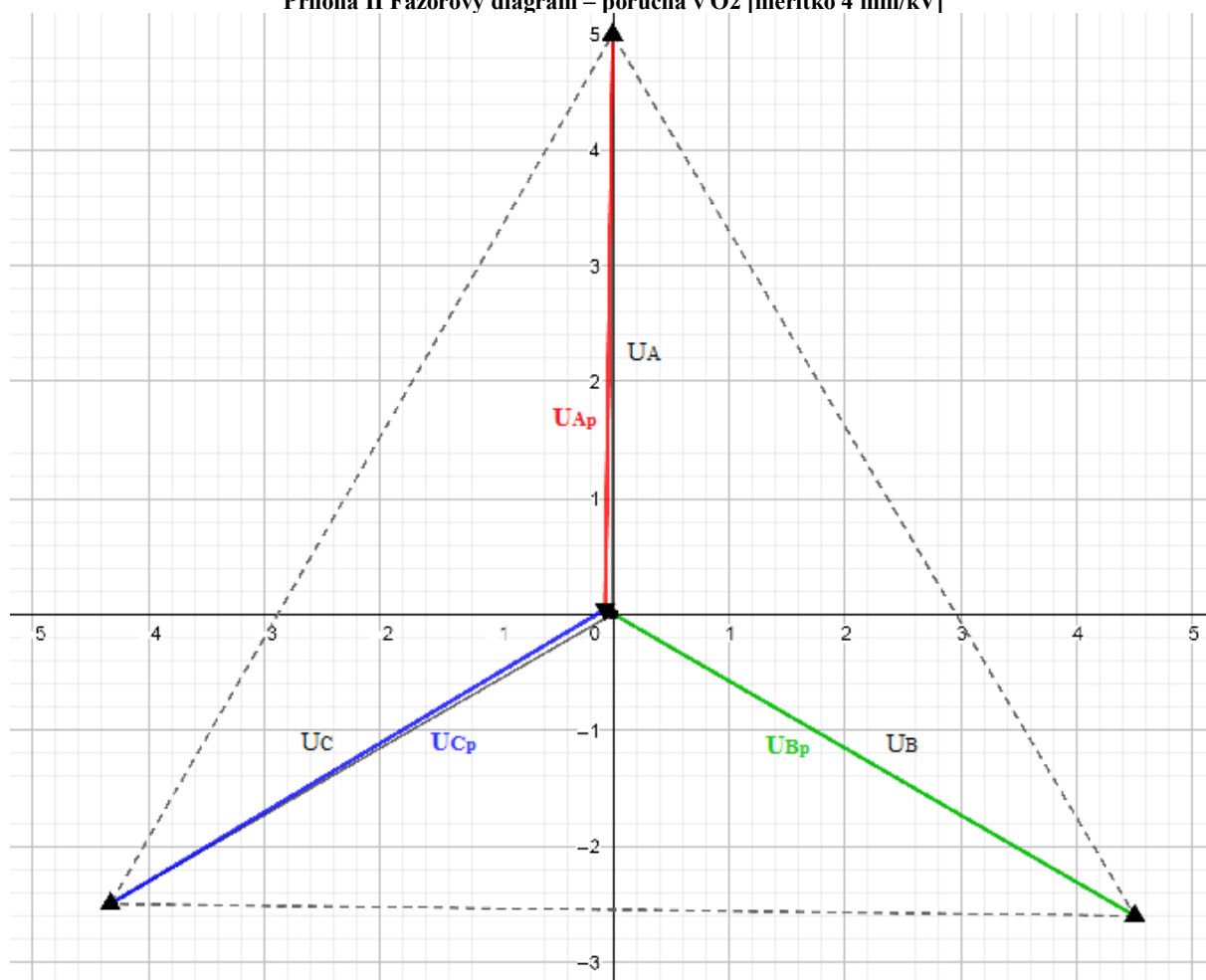
Seznam příloh

Příloha I Fázorový diagram – porucha v O1 [měřítko 4 mm/kV]	- 54 -
Příloha II Fázorový diagram – porucha v O2 [měřítko 4 mm/kV]	- 55 -
Příloha III Fázorový diagram – porucha v O1 (modifikace) [měřítko 4 mm/kV]	- 56 -
Příloha IV Fázorový diagram – porucha v O2 (modifikace) [měřítko 4 mm/kV]	- 57 -
Příloha V Příloha na CD/DVD – Simulační model v EMTP-ATP (model1.3.8.acp)	

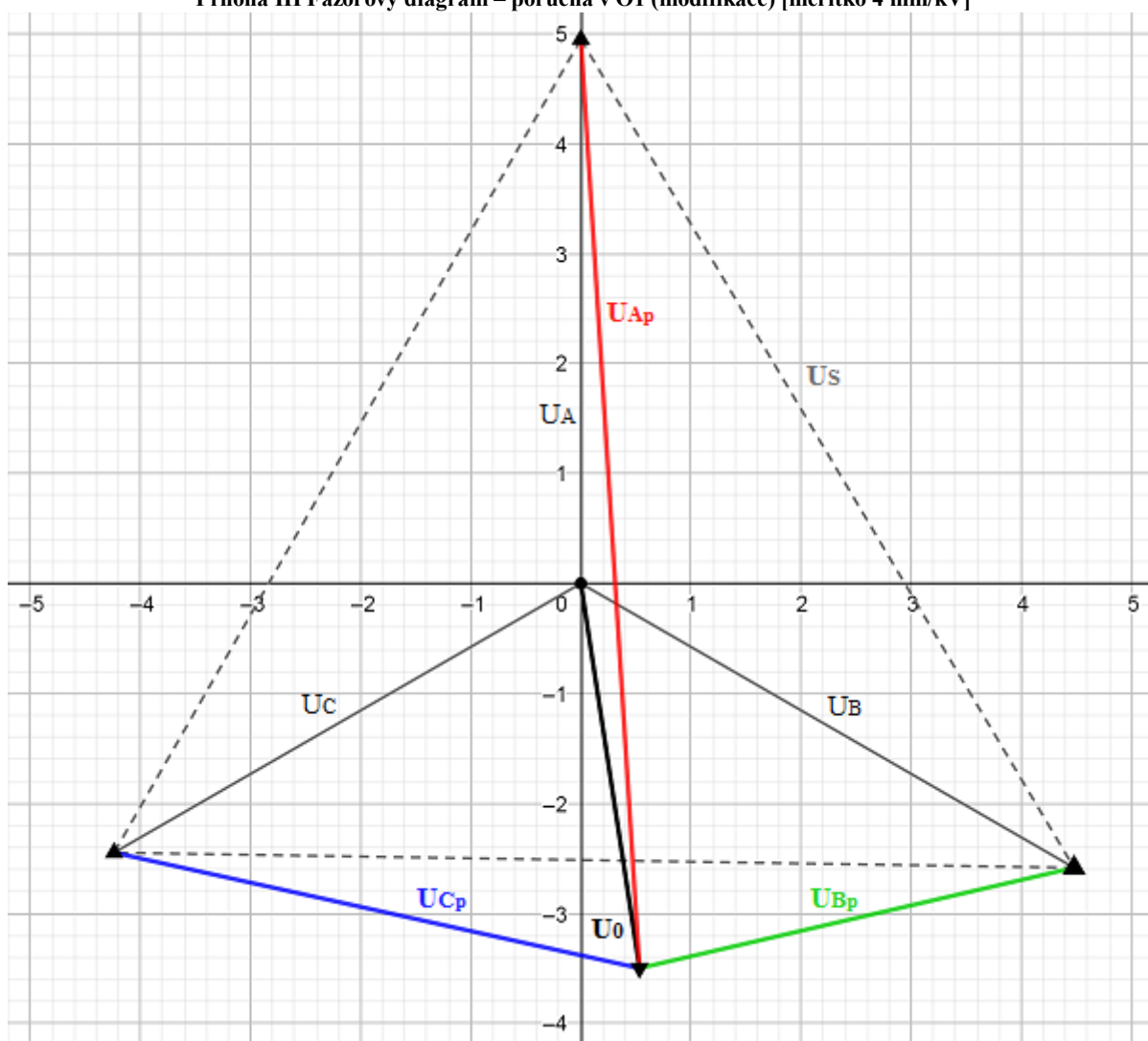


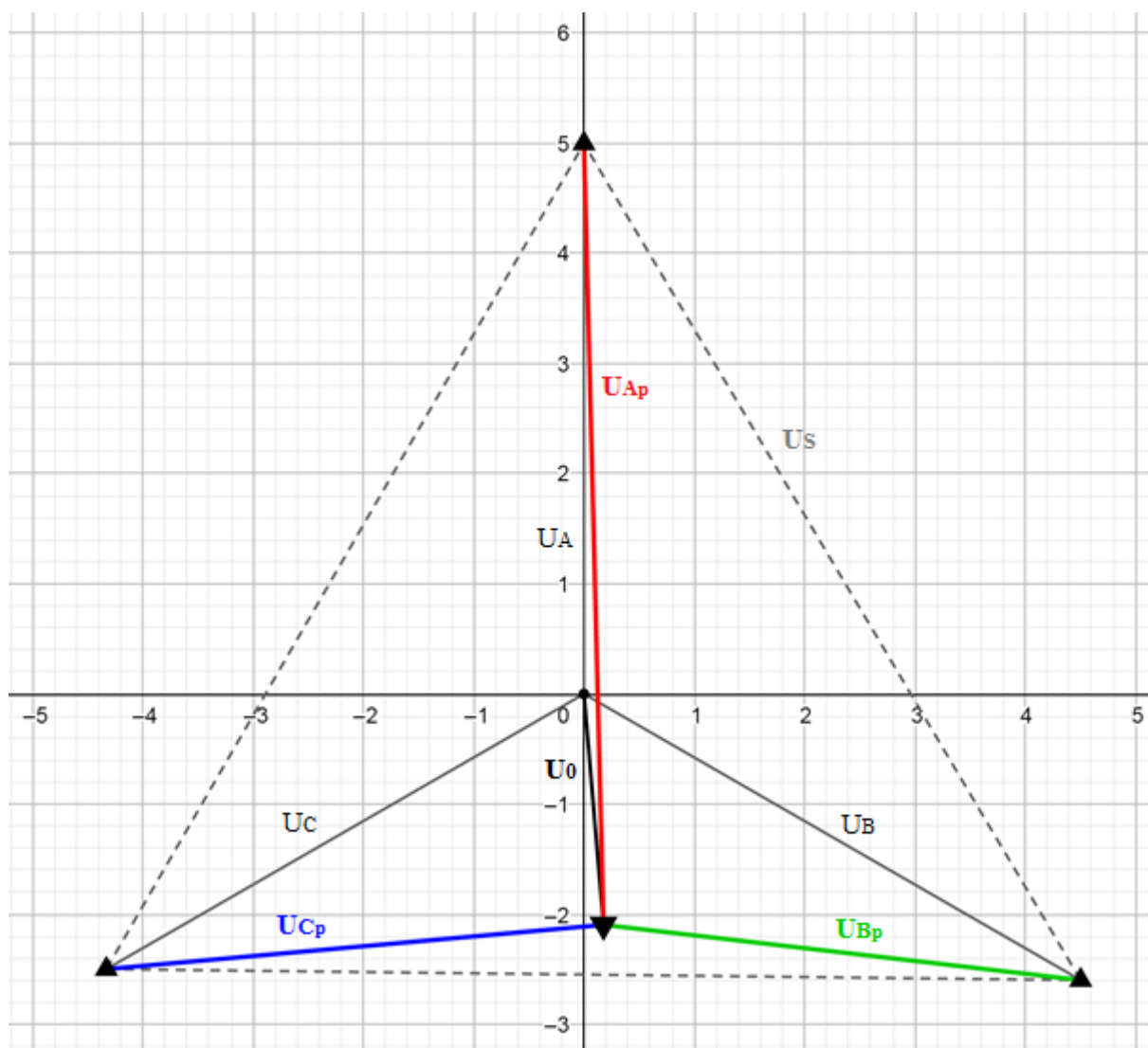
Příloha I Fázorový diagram – porucha v O1 [měřítko 4 mm/kV]

Příloha II Fázorový diagram – porucha v O2 [měřítko 4 mm/kV]



Příloha III Fázorový diagram – porucha v O1 (modifikace) [měřítko 4 mm/kV]





Příloha IV Fázorový diagram – porucha v O2 (modifikace) [měřítko 4 mm/kV]